Technische Universität München
Lehrstuhl für Forstliche Arbeitswissenschaft und Angewandte Informatik

Simulation forsttechnischer Arbeitsprozesse unter Einsatz der Software AutoMod durch Modellierung eines Testbestandes aus dem Staatlichen Forstamt Paderborn

Martin Hemm

Vollständiger Abdruck der von der Fakultät Wissenschaftszentrum Weihenstephan für Ernährung, Landnutzung und Umwelt der Technischen Universität München zur Erlangung des akademischen Grades eines

Doktors der Forstwissenschaften (Dr. rer. silv.)

genehmigten Dissertation.

Vorsitzender: Univ.-Prof. Dr. Th. F. Knoke

Prüfer der Dissertation:
1. Univ.-Prof. Dr. W. Warkotsch
2. Univ.-Prof. Dr. Dr. h.c. G. Wegener

Die Dissertation wurde am 27.09.2006 bei der Technischen Universität München eingereicht und durch die Fakultät Wissenschaftszentrum Weihenstephan für Ernährung, Landnutzung und Umwelt der Technischen Universität München am 15.12.2006 angenommen.

Danksagung

Der Abschluss der hier vorliegenden Arbeit stellt für mich persönlich das Ende eines sehr schönen und lehrreichen Lebensabschnitts dar, das ich nur durch die Mithilfe zahlreicher Personen, die mich über die vergangenen vier Jahre hinweg auf vielfältige Weise unterstützt haben, erreichen konnte. Ihnen möchte ich auf diese Weise herzlich danken:

Im Rahmen der Bearbeitung unterschiedlicher Forschungsprojekte, die ich am Lehrstuhl für Forstliche Arbeitswissenschaft und Angewandte Informatik betreuen konnte, war es mir möglich, das Themenfeld „Simulation von Holzernteoperationen“ näher kennen zu lernen und in Form dieser Dissertation vertiefend zu bearbeiten. Daher gilt mein großer Dank dem Leiter des Lehrstuhls, meinem Doktorvater Herrn Professor **Walter Warkotsch** für die Betreuung der Promotion, die fachliche Beratung und Diskussion und nicht zuletzt für seinen großen Einsatz, mir in Zeiten knapper Kassen eine gesicherte Anstellung zu ermöglichen.

Den Einstieg in meine Tätigkeit am Lehrstuhl verdanke ich auch meiner ehemaligen Kollegin Frau Dr. **Anne-Katrin Visser**, die bereits meine Diplomarbeit betreute und mich schließlich 2003 für die Bearbeitung eines unmittelbar anstehenden Projektes vorschlug.

Während der gesamten Zeit, die ich am Lehrstuhl verbringen dürfte, waren das freundschaftliche Verhältnis zu und die produktiven Diskussionen mit meinen Arbeitskollegen eine wichtige Voraussetzung für das Gelingen meiner Arbeit. Dafür möchte ich mich bei Herrn Dr. **Ekkehard von Bodelschwingh,** Herrn Dr. **Sven Korten**, Herrn Dr. **Jürgen Bauer**, Herrn **Alexander Eberhardinger**, Herrn Dr. **Martin Ziesak**, Herrn **Matthias Müller** und Frau **Elfriede Kleidorfer** bedanken. Es ist mir besonders wichtig, die wirklich große Unterstützung bei der Bearbeitung schwieriger Fragestellungen zu betonen, die ich von meinen Kollegen Herrn Dr. **Reinhard Pausch** und Herrn **Martin Döllerer** erhalten habe. Ich möchte mich dafür entsprechend besonders bedanken!

Für die Arbeit mit der Simulationssoftware AutoMod war ich auf externe Hilfe angewiesen und erhielt diese durch die Softwarefirma SimPlan Integrations GmbH aus Witten. Der Einsatz und die Begeisterung, die SimPlan in die Zusammenarbeit eingebracht hat, können nach meiner Einschätzung nur als außergewöhnlich bezeichnet werden. In stundenlangen Telefonkonferenzen, Email-Kontakten und persönlichen Treffen war es besonders Herr **Sven Oros**, der eine weit über „normale“ Geschäftsbeziehungen hinaus gehende Identifikation mit der Forschungsaufgabe entwickelte und diese mit einem nahezu unerschöpflichen Enthusiasmus bearbeitete. Ich möchte diese Unterstützung deutlich hervorheben und mich noch einmal von Herzen bedanken! Aber auch die beiden Geschäftsführer der Simplan Integrations GmbH, Herr Dr. **Axel Radtke** und Herr **Jörg Kemper** haben die Entwicklungen und Umsetzungen im Bereich Simulation zu jedem Zeitpunkt tatkräftig gefördert und dadurch ebenfalls einen großen Anteil an der geleisteten Arbeit.

Ein Großteil der Forschungsprojekte, deren Ergebnisse in diese Dissertation mit einfließen, wurde von der Landesanstalt für Ökologie, Bodenordnung und Forsten des Landes Nordrhein-Westfalen in Auftrag gegeben und entsprechend inhaltlich und finanziell unterstützt. Dafür möchte ich namentlich Herrn Dr. **Rainer Joosten**, Herrn **Thilo Wagner**, Herrn **Norbert Nolte** und Herrn **Günter Spelsberg** danken.

Im Rahmen der Projekte mussten auch umfangreiche Zeitstudien im Forstamt Paderborn durchgeführt werden. Dabei konnte ich auf die tatkräftige Unterstützung von Herrn **Dieter Feldkötter** zählen, der die Vorbereitungen und den Maschineneinsatz perfekt organisierte. Den Umgang mit dem für diese Studien benötigten Theodoliten und die Auswertung der eingemessenen Werte brachte mir Herr Dr. **Jürgen Zander** vom ehemaligen Lehrstuhl für Landnutzungsplanung und Naturschutz der TU München mit großem persönlichen Engagement und viel Geduld näher. Die Markierung der Einzelbäume in den Beständen und die Aufnahme aller benötigten Daten übernahmen die beiden Forstwirte Herr **Alexander Stellberg** und Herr **Carsten Schüller** sowie die Diplomandin Frau **Ramona Pohl**. Herzlichen Dank an alle fünf!
Neben der Simulationssoftware AutoMod kamen im Rahmen der einzelnen Projekte auch die Programme HOLZERNTE der FVA Baden-Württemberg und SILVA des Lehrstuhls für Waldwachstumskunde der TU München zum Einsatz. Bei der Einarbeitung und der weiteren Anwendung der beiden Programme standen mir jederzeit Frau **Daniele Stöhr** und Herr Dr. **Peter Biber** hilfreich zur Seite.

Abseits aller Lehrstuhl- und Projektarbeiten konnte diese Dissertation nur deshalb fertig gestellt werden, weil ich mir jederzeit der vollen Unterstützung meines privaten Umfeldes sicher sein konnte. Dazu gehören zuallererst meine Eltern, Herr Dr. **Rolf Hemm** und Frau **Brigitte Hemm** sowie meine Schwester Frau Dr. **Simone Hemm** und meine liebe Freundin **Verena**. Sie alle waren auch in schwierigen Momenten immer für mich da und haben mir dadurch das erfolgreiche Abschließen dieses Lebensabschnitts ermöglicht.

Summary

Within the scope of her dissertation BRUCHNER (2004) managed to employ the simulation software AutoMod, which has been used in different sectors of industry (e.g. automobile industry) so far, within the domain of forestry for the first time. By modelling a schematic designed 1 ha stand of spruce and simulating the two forestal working systems harvester and forwarder, she was able to calculate different specific values (duration, productivity and costs) on an especially set up harvesting operation. These values were computed by the software with regard to the direct influence of various stand attributes like extraction line system, tree species, tree position and dimension of every single tree and its logs.

The objective of BRUCHNER´s research has been defined as the simulation of really existing forestal structures at a single tree-based level and various, commonly used working systems depending on the characteristics of each certain stand to calculate detailed values, which then can be used to support decision makers in today's forestry.

BRUCHNER just reached that ambitious target partly, but her first model was the basis for the work presented here. With regard to the modelling of forestal structures and working systems her model still left lots of potential for further developments, which will be done in terms of this dissertation.

Although even in this publication the whole objective BRUCHNER ones formulated could not be fulfilled in total, the author managed to integrate numerous innovations and enhancements within a new developed, 11 ha big model of a really existing stand of spruce. Thereby a few starting points of BRUCHNER´s strategy were adopted, but the major part of the working concept had to be invented in a completely new way.

Under the authority of the Landesanstalt für Ökologie, Bodenordnung und Forsten (LÖBF) of North Rhine-Westphalia and in cooperation with the firm SimPlan Integrations from Witten, Germany, it was possible to build up a new stand model on the basis of AutoMod that is able to simulate every kind of stand area, extraction line system, stand (including information on the freely selectable logs), harvesting operation and a variety of five working systems: harvester, chainsaw workers, forwarder, skidder, horse. All of these tasks are just realizable, if the needed data is available in an adequate quality.

This versatile, by the help of different experiments proven usability of the latest model, represents a significant progress in comparison to the first prototype BRUCHNER created. It's the result of intensive research and tests in the domain of generating and simulating forestal structures, opening and working systems, which "behaviour" can be adjusted to every kind of scenario occurring in practice every day by changing a multitude of individual parameters.

The verification of the new model has been done without any problems and finished successfully, but the validation is much more complex. POHL (2006) was able to reproduce a really existing stand by measuring approximately 400 trees that were cut and hauled by one harvester and one forwarder during an especially planned harvesting operation. Additionally the values of the harvester calculated by the model have been compared with values from six different time studies, which have been extracted out of literature. In the end the results for both of the machines were satisfactory.

At the moment the model in its current state will be used for research in the first place by simulating and evaluating certain working systems in certain forestal situations as well as in lectures at universities and colleges of higher education. A practical use apart from scientific experiments would be too early because the user friendliness is insufficient and the validation work has not yet been finished.

Nevertheless this dissertation represents a significant step on the field of harvesting simulations that has already been appreciated during several presentations on national and international conventions and conferences.

Inhaltsverzeichnis

1 EINLEITUNG 1

2 ZIELE DER ARBEIT 4

2.1 ABGRENZUNG ZU DEN ZIELEN VORANGEGANGENER ARBEITEN 4

2.2 ZIELE DER ARBEIT 6

2.2.1 Erweiterungen bei der Darstellung der Bestandesfläche, der Erschließungssysteme und der Polter 6

2.2.2 Erweiterungen bei der Darstellung des aufstockenden und des zu erntenden Bestandes 7

2.2.3 Erweiterungen bei der Darstellung der Arbeitssysteme 9

2.2.4 Erweiterungen bei der Ergebnis-Präsentation und der graphischen Darstellung der Simulation 12

3 DIE PROJEKTE UND DIE SOFTWARE 13

3.1 DIE PROJEKTE 13

3.2 DIE SIMULATIONSSOFTWARE AUTOMOD 14

4 DATENGEWINNUNG UND DATENAUFBEREITUNG 16

4.1 DIE BESTANDESFLÄCHE 16

4.2 GEWINNUNG UND AUFBEREITUNG DER DATEN DES ERSCHLIEßUNGSSYSTEMS INKL. POLTERPLÄTZE 17

4.2.1 Definition der Erschließungslinien 18

4.2.2 Gewinnung GIS-tauglicher Koordinaten von Start-, End- und Schnittpunkten der Erschließungslinien sowie der Polterplätze 19

4.2.3 Implementierung der Wegenetzdaten in das Modell 22

4.3 GEWINNUNG UND AUFBEREITUNG DER DATEN DES AUFSTOCKENDEN UND AUSSCHEIDENDEN BESTANDES 25

4.3.1 Das Forsteinrichtungswerk als Informationsquelle 25

4.3.2 Modellierung des aufstockenden und ausscheidenden Bestandes 26

4.3.2.1 Der Waldwachstumssimulator SILVA 27

4.3.2.2 Zusammenführung der Daten unterschiedlicher Bestände 29

4.3.2.3 Das Programm HOLZERNTE 32

4.3.3 Zusammenführung der gewonnen Informationen in einer zentralen Datenbank 34

4.3.4 Entity-Relationship-Diagramme 39

4.3.5 Übersicht Gesamtablauf 42

5. AUFBAU EINER HOLZERNTESIMULATION 43

5.1 BENUTZERFREUNDLICHKEIT 43

5.2 MENÜFUNKTIONEN 43

5.3 ALLGEMEINE ÜBERSICHT ÜBER DAS MODELL 52

5.3.1 Zeitarten 52

5.3.2 Kurzübersicht 53

5.3.3 Klassendiagramm 56

5.3.4 Detaillierte Übersicht 57

5.4 DER DATENFLUSS 65

5.5 ERZEUGUNG DES LAYOUTS 69

5.6 DIE ARBEITSSYSTEME 72

5.6.1 Der Harvester 73

5.6.1.1 Benutzeroberfläche und einstellbare Parameter 73

5.6.1.2 Aufbau und Einsatz der Kalkulationsformeln 75

5.6.1.3 Festlegung der Gassenreihenfolge 76

5.6.1.4 Systemlogik und Ablaufdiagramm 78
5.6.1.5 Übersicht über die Eingangs-, Ausgangs- und Zustandsdaten sowie die graphische Umsetzung im Modell 80
5.6.2 Die Motormanuelle Holzernte 82
5.6.2.1 Benutzeroberfläche und einstellbare Parameter....82
5.6.2.2 Ermittlung der Tabellen-Vorgabezeit (GAZ) pro Stammabschnitt für Arbeiter und Motorsäge auf Grundlage des Erweiterten Sortentarifs (EST) 84
5.6.2.3 Festlegung und Einbeziehung der EST-Zuschläge 86
5.6.2.4 Einbeziehung des Zeitgrades 88
5.6.2.5 Kostensätze 90
5.6.2.6 Systemlogik und Ablaufdiagramm 90
5.6.2.7 Übersicht über die Eingangs-, Ausgangs- und Zustandsdaten sowie die graphische Umsetzung im Modell 94
5.6.3 Der Forwarder 96
5.6.3.1 Benutzeroberfläche und einstellbare Parameter....96
5.6.3.2 Aufbau und Einsatz der Kalkulationsformeln 99
5.6.3.3 Systemlogik und Ablaufdiagramm 100
5.6.3.4 Übersicht über die Eingangs-, Ausgangs- und Zustandsdaten sowie die graphische Umsetzung im Modell 102
5.6.4 Der Schlepper....104
5.6.4.1 Benutzeroberfläche und einstellbare Parameter....104
5.6.4.2 Ermittlung der Tabellen-Vorgabezeit (GAZ) pro Stammabschnitt für den Schlepper auf Grundlage des Schleppertarifs des Landes Nordrhein-Westfalen 105
5.6.4.3 Festlegung und Einbeziehung der Zuschläge für Bestandesschäden....106
5.6.4.4 Aufbau und Einsatz der Kalkulationsformeln des Schleppertarifs NRW....106
5.6.4.5 Kostensätze 108
5.6.4.6 Systemlogik und Ablaufdiagramm 108
5.6.4.7 Übersicht über die Eingangs-, Ausgangs- und Zustandsdaten sowie die graphische Umsetzung im Modell 110
5.6.5 Das Rückepferd....112
5.6.5.1 Benutzeroberfläche und einstellbare Parameter....112
5.6.5.2 Aufbau und Einsatz der Kalkulationsformel des Tarifes für die Rückung mit Pferden....112
5.6.5.3 Kostensätze 114
5.6.5.4 Systemlogik und Ablaufdiagramm 114
5.6.5.5 Übersicht über die Eingangs-, Ausgangs- und Zustandsdaten sowie die graphische Umsetzung im Modell 117
5.7 DIE MASCHINENDATENBANK 118
5.8 DIE POLTER 119

6 VERIFIZIERUNG DER SYSTEMFUNKTIONEN 120

6.1 HARVESTER 121
6.2 MOTORMANUELLE HOLZERNTE.... 122
6.3 FORWARDER 124
6.4 SCHLEPPER 125
6.5 PFERD.... 129

7 VERSUCHE MIT UNTERSCHIEDLICHEN ERSCHLIEßUNGSSYSTEMEN 130

7.1 VERSUCHE MIT DEM ARBEITSSYSTEM HARVESTER 134
7.1.1 Versuchsreihe 1: Auswirkungen von Veränderungen der Kranreichweite des Harvesters auf verschiedene Systemparameter bei gleichzeitiger Veränderung des Rückegassenabstandes 136
7.1.2 Versuchsreihe 2: Auswirkungen von Veränderungen des Zeitgrades des Harvesters auf verschiedene Systemparameter bei gleichzeitiger Veränderung des Rückegassenabstandes auf verschiedene Ergebnisgrößen 145
7.1.3 Versuchsreihe 3: Auswirkungen von Veränderungen des Anteils der Maschinenarbeitsstunden (MAS) an der Gesamtarbeitszeit (GAZ) des Harvesters auf verschiedene Systemparameter bei gleichzeitiger Veränderung des Rückegassenabstandes 150
7.2 VERSUCHE MIT DEM ARBEITSSYSTEM MOTORMANUELLE HOLZERNTE.... 155

7.2.1 Versuchsreihe 1: Auswirkungen von Veränderungen der Anzahl von Waldarbeitern auf verschiedene Systemparameter bei gleichzeitiger Veränderung des Rückegassenabstandes ... 156
7.2.2 Versuchsreihe 2: Auswirkungen von Veränderungen des Zeitgrades von drei Waldarbeitern auf verschiedene Systemparameter bei gleichzeitiger Veränderung des Rückegassenabstandes ... 158
7.3 VERSUCHE MIT DEM ARBEITSSYSTEM FORWARDER ... 162
7.3.1 Versuchsreihe 1: Auswirkungen von Veränderungen der Ladekapazität des Forwarders auf verschiedene Systemparameter bei gleichzeitiger Veränderung des Rückegassenabstandes ... 163
7.3.2 Versuchsreihe 2: Auswirkungen von Veränderungen des Zeitgrades des Forwarders auf verschiedene Systemparameter bei gleichzeitiger Veränderung des Rückegassenabstandes ... 169
7.3.3 Versuchsreihe 3: Auswirkungen von Veränderungen des Anteils der Maschinenarbeitsstunden (MAS) an der Gesamtarbeitszeit (GAZ) des Forwarders auf verschiedene Systemparameter bei gleichzeitiger Veränderung des Rückegassenabstandes ... 173
7.4 VERSUCHE MIT DEM ARBEITSSYSTEM SCHLEPPER ... 176
7.4.1 Versuchsreihe 1: Auswirkungen von Veränderungen des Zeitgrades des Schleppers auf verschiedene Systemparameter bei gleichzeitiger Veränderung des Rückegassenabstandes ... 180
7.4.2 Versuchsreihe 2: Auswirkungen von Veränderungen der Arbeitsstrategie des Schleppers auf verschiedene Systemparameter bei zum Teil gleichzeitiger Veränderung des Zeitgrades ... 183
7.5 VERSUCHE MIT DEM ARBEITSSYSTEM PFERD ... 188
7.5.1 Versuchsreihe: Auswirkungen von Veränderungen des Zeitgrades des Pferdes auf verschiedene Systemparameter bei gleichzeitiger Veränderung des Rückegassenabstandes ... 191
7.6 ZUSAMMENFASSUNG DER VERSUCHSERGEBNISSE ALLER FÜNF UNTERSUCHTEN ARBEITSSYSTEME ... 195
7.7 DAS ORIGINAL-ERSCHLIEßUNGSSYSTEM ALS REFERENZ ... 198
7.8 VERSUCHSERGEBNISSE ALS ENTSCHEIDUNGSUNTERSTÜTZUNG ... 201

8 VARIATION TATSÄCHLICH EXISTIERENDER ERSCHLIEßUNGSSYSTEME ... 207

9 SIMULATION DER HOLZERNTE IN EINEM AUSGEWÄHLTEN BESTAND ÜBER MEHRERE ALTERSSTUFEN HINWEG ... 210

9.1 DER ORIGINALBESTAND IM DURCHSCHNITTLICHEN ALTER VON 45 JAHREN ... 212
9.2 DER ORIGINALBESTAND IM DURCHSCHNITTLICHEN ALTER VON 55 JAHREN ... 214
9.3 DER ORIGINALBESTAND IM DURCHSCHNITTLICHEN ALTER VON 65 JAHREN ... 216
9.4 DER ORIGINALBESTAND IM DURCHSCHNITTLICHEN ALTER VON 75 JAHREN ... 218
9.5 DER ORIGINALBESTAND IM DURCHSCHNITTLICHEN ALTER VON 85 JAHREN ... 220
9.6 ZUSAMMENFASSUNG DER ERGEBNISSE DER ALTERUNGSVERSUCHE ... 222

10 VALIDIERUNG DER MODELLFUNKTIONEN ... 226

10.1 ERHEBUNG VON BESTANDES- UND SYSTEMDATEN ZU VALIDIERUNGSZWECKEN ... 226
10.2 VALIDIERUNGSVERSUCHE ZU DEN ARBEITSSYSTEMEN HARVESTER UND FORWARDER ... 227
10.2.1 Validierungsversuche mit dem System Harvester ... 228
10.2.2 Validierungsversuch mit dem System Forwarder ... 237
10.3 ZUSAMMENFASSUNG DER ERGEBNISSE DER VALIDIERUNGSVERSUCHE ... 239

11 KRITISCHE WÜRDIGUNG DER ARBEIT UND AUSBLICK ... 241

11.1 WEITERENTWICKLUNG DES BASISMODELLS VON BRUCHNER ... 241
11.2 KRITISCHE WÜRDIGUNG DER METHODISCHEN VORGEHENSWEISE ... 244
11.2.1 Darstellung real existierender forstlicher Strukturen und Arbeitssysteme ... 245
11.2.2 Verifizierung und Validierung ... 251
11.2.3 Einsatz des Modells in der Forschung ... 252
11.2.4 Einsatz des Modells in der Praxis ... 253
11.2.5 Einsatz des Modells in der Lehre ... 253

11.3 AUSBLICK 255
11.3.1 Allgemeine Vorgehensweise *255*
11.3.2 Weiterentwicklung des bestehenden Modells *255*

12 ZUSAMMENFASSUNG 260

VERZEICHNISSE 262

ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS 262
LITERATURVERZEICHNIS 263
ABBILDUNGSVERZEICHNIS 269
TABELLENVERZEICHNIS 275
ANHANG 278
Anhang I *278*
Anhang II *288*
Anhang III *290*
Anhang IV *291*
Anhang V *293*
Anhang VI *294*
Anhang VII *296*
Anhang VIII *297*
Anhang IX *299*
Anhang X *302*

1 Einleitung

Die Anforderungen, die ein zunehmend global ausgerichteter Handel mit Rohholz und Holzwaren an die forstliche Produktion stellt, haben sich in den letzten Jahren deutlich erhöht. Dabei geht es neben qualitativen Aspekten, wie beispielsweise der Zertifizierung, besonders um eine Reduktion der Produktionskosten durch Verminderung der entsprechenden Arbeits- und Durchlaufzeiten. Es ist daher unerlässlich, den Materialfluss und die Maschineneinsätze in der Holzernte zielorientiert zu planen, um die von der Holzindustrie nachgefragten Ressourcen in kurzer Zeit, so kostengünstig wie möglich und in der gewünschten Qualität zu mobilisieren (WARKOTSCH, ZIESAK, 1998).

Die Nachfrage nach dem Rohstoff Holz hat in den vergangenen Jahren in Deutschland sowohl von Seiten der Säge- und Papier-, aber auch von Seiten der mit Energieholz handelnden Industrie stark zugenommen (MANTAU, 2006). Besonders die Sägeindustrie hat im letzten Jahrzehnt einen Konzentrationsprozess durchlaufen, der bis zum heutigen Zeitpunkt zum Bau mehrerer Werke mit einer jährlichen Einschnittkapazität > 1.000.000 m^3 geführt hat (VON BODELSCHWINGH, 2006). Diese Werke müssen kontinuierlich mit ausreichenden Holzmengen versorgt werden, um ihre Produktion aufrecht zu erhalten. Damit dieser Bedarf bzw. die als Folge der zweiten Bundeswaldinventur (BWI II, 2005) stark angestiegene Nachfrage der gesamten Holzwirtschaft quantitativ und qualitativ gedeckt werden kann, müssen die Forstbetriebe als Produzent des Rohstoffes Holz reagieren. Aktuell geschieht dies in Form von groß angelegten Umstrukturierungen bei nahezu allen Landesforstverwaltungen in Deutschland. Damit einhergehend kommt es zu einer deutlichen Reduktion der staatlichen Forstämter, zu einer Vergrößerung der zu bewirtschaftenden Einheiten und infolgedessen zu divergierenden Ablauforganisationen bei der Planung und Steuerung forstlicher Prozesse. Um die Effizienz dieser Prozesse bei gleichzeitiger Einhaltung der festgelegten Einsparauflagen steigern zu können, sollten die Entscheidungsträger durch Informationstechnik gestützte Verfahren erlernen und einsetzen. Die forstlichen Planungs- und Steuerungsaufgaben müssen daher durch prozessfördernde Fachsoftware unterstützt werden. Dies führt zu deutlich steigenden Ansprüchen an die Qualität und die Verfügbarkeit dieser Informationstechnik (ZIEGLER, 2006).

Neben den Bereichen Kommunikation, Informationsfluss und Datenverwaltung werden auch bei der **Holzernte-Logistik** verstärkt **neue Arbeitsstrategien diskutiert und umgesetzt** (VON BODELSCHWINGH, 2006). So haben beispielsweise die Bayerischen Staatsforste ihre bisherige **Produktionslogistik** komplett neu strukturiert und streben nun eine Ablösung des klassischen Holzverkaufs „Frei-Waldstraße“ zugunsten einer „Frei-Werk-Lieferung“ an (FREIDHAGER, 2006).

Die **Produktionslogistik** stellt ein wichtiges Werkzeug des Produktionsmanagements dar. Das **Produktionsmanagement** wiederum ist das Konzept, welches zur Gestaltung und Lenkung der Produktion in einem bestimmten Industriebereich eingesetzt wird. In diesem Zusammenhang versteht man die Produktionslogistik als eine betriebswirtschaftliche Disziplin, deren Gegenstand die Entscheidungen sind, die in Zusammenhang mit der Vorbereitung, Durchführung und Kontrolle der Produktion zu fällen sind. Mit eingeschlossen ist auch die Gestaltung aller logistischen Prozesse (MARKMILLER, 2002).

Während die Planung und Steuerung der Produktion und des Materialflusses in außerforstlichen Industriebetrieben oft durch Einsatz von **Ablaufsimulationen (Virtual Manufacturing)** unterstützt werden, findet dieses Instrument im Forstbereich bis heute nur begrenzt Anwendung.

Simulation als Technik zur Nachbildung und Analyse der Prozesse in einem realitätsnahen Modell ist ein Instrument der Produktionslogistik und wird als Verfahren des Operations Research zum Testen von Lösungsalternativen eingesetzt. Ist eine hinreichend korrekte Abbildung zwischen Produktionsrealität und Modell gesichert, lassen sich die Abläufe des realen Systems im Modell nachvollziehen und Kenntnisse über das Modellverhalten sammeln, die Rückschlüsse auf das Verhalten des Originals und im besten Fall eine Übertragung der abgeleiteten Modelldaten auf das reale System erlauben (PAGE et al., 1988).

Am Lehrstuhl für Forstliche Arbeitswissenschaft und Angewandte Informatik der Technischen Universität München wird seit dem Jahr 2001 daran gearbeitet, die von anderen Industriezweigen genutzte **Simulationssoftware AutoMod** im Bereich der forstlichen Produktionsplanung einzusetzen. BRUCHNER (2004)[1] gelang es im Rahmen dieser Forschungsarbeiten, **ein erstes Basismodell** eines 1 ha großen, schematisch strukturierten Fichtenbestandes zu entwickeln, das gleichzeitig in der Lage war, die forstlichen Ablaufsysteme **Harvester und Forwarder bei ihrem Einsatz im Bestand zu simulieren und systemspezifische Kennzahlen** wie Dauer, Produktivität und Kosten in Abhängigkeit der Einflussfaktoren Eingriffsart und Eingriffsstärke, Volumen der einzelnen Bäume, Art der ausgehaltenen Sortimente sowie der zu Beginn der Simulation festgelegten Systemparameter **zu berechnen**.

Durch das Simulieren der Holzernte kann eine breite Palette für einen bevorstehenden Holzernteeinsatz relevanter Daten ermittelt werden, die dann als **Entscheidungsgrundlage im Holzerntemanagement** genutzt werden können. Doch aus welchem Grund sollte ein Entscheidungsträger im Forst heute diese planungsrelevanten Informationen benötigen und einsetzen, die er vor zehn oder zwanzig Jahren noch nicht zur Verfügung hatte?

In naher Zukunft werden **forstliche Planungsprozesse** überwiegend **nicht mehr** von den **vor Ort** in einem Forstamt angesiedelten Beamten bzw. Betriebsleitern für recht kleinflächige Waldeinheiten durchgeführt, vielmehr kommt es zu einer **stärkeren Zentralisierung des Steuerungsapparates**. **Eine verringerte Zahl von Angestellten** ist dann – unter Beachtung der individuellen Kundenansprüche sowie der gewünschten Qualität der Einsätze und Produkte und der zu erwirtschaftenden Renditen - für die **Planung und Umsetzung einer immer größeren Zahl von Holzernteeinsätzen zuständig** (JOOSTEN, 2005). Um diesen Personen für diese Aufgaben eine **bestmögliche Informationsgrundlage** zur Verfügung stellen zu können, müssen von Seiten der Wissenschaft und Forschung geeignete Hilfsmittel zur Gewinnung dieser Informationen entwickelt werden.

[1] Es empfiehlt sich, zum besseren Verständnis der vorliegenden Arbeit die Dissertation von BRUCHNER zu lesen:
BRUCHNER, A.-K. (2004): Industrielle Simulationssoftware als Entscheidungsunterstützungsinstrument in der Produktionslogistik der Holzerntekette, Lehrstuhl für Forstliche Arbeitswissenschaft und Angewandte Informatik der TU München (http://tumb1.biblio.tu-muenchen.de/publ/diss/ww/2004/bruchner.html)

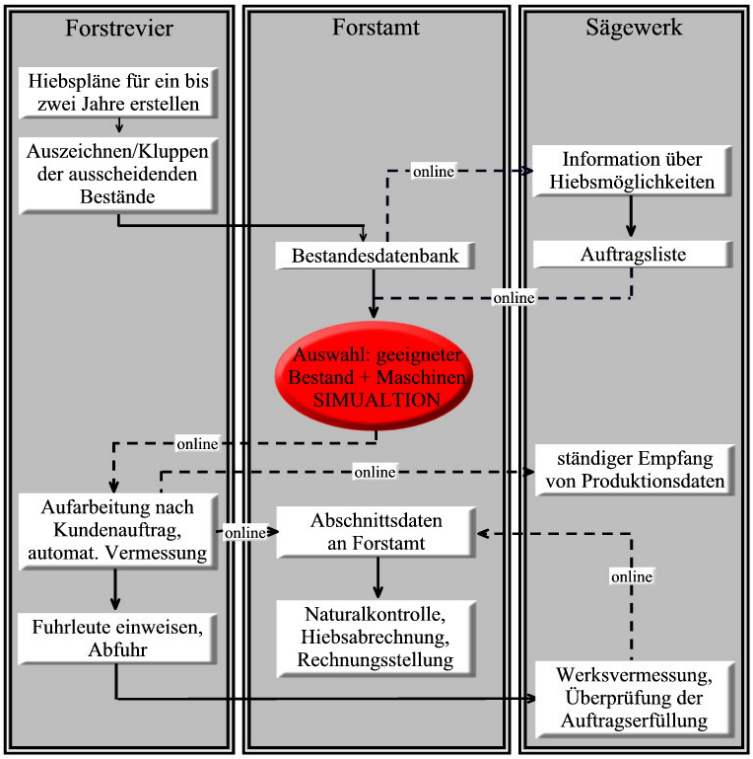


Abbildung 1: Eingliederung der Simulation in ein Beispiel für die Abläufe forstlichen Produktionsmanagements (Quelle: HEMM, 2002)

BRUCHNER (2004) verfolgte in ihrer Arbeit die Grundidee, Simulation als Teil des Supply Chain Managements in Form eines **Entscheidungsunterstützungsinstrumentes zur Steigerung von Effektivität und Effizienz der eingesetzten Maschinensysteme in der forsttechnischen Produktion** zu verwenden (s. Abbildung 1). **Wesentliche Vorteile** liegen nach THEES (1998) - bei entsprechender Verfügbarkeit der notwendigen Inventurdaten - in folgenden Punkten:

- Auswahl derjenigen Waldbestände für eine Ernte, die sich zur Erfüllung der Kundenbedürfnisse hinsichtlich Baumarten, Sortimenten, Kosten etc. besonders eignen,
- Zeitliche und räumliche Koordinierung von Hiebsmaßnahmen,
- Simulation und Bewertung unterschiedlicher Einschlagsverfahren und Maschinenkombinationen, die für den ausgewählten Bestand am besten geeignet sind,
- Reduktion von Umweltbelastungen durch Rückung und Transport durch verbesserte Einsatzkoordination,
- Bessere Berechnungs- und Verhandlungsgrundlagen für zukünftige Entscheidungen,
- Möglichkeit des direkten Vergleichs unterschiedlicher Holzernteszenarien zur Darstellung ökonomischer und ökologischer Zusammenhänge zu Lehrzwecken.

Ein erstes Simulationsmodell wurde von BRUCHNER entwickelt. Trotzdem gilt es, das große Entwicklungspotenzial dieses Forschungsansatzes noch deutlich tief greifender auszuschöpfen. Diese Aufgabe wird im Rahmen der hier vorliegenden Arbeit fortgesetzt. Die genauen Zielsetzungen sind im folgenden Kapitel beschrieben.

2 Ziele der Arbeit

2.1 Abgrenzung zu den Zielen vorangegangener Arbeiten

Um die Ziele der in diesem Dokument beschriebenen Forschungs- und Entwicklungsarbeiten besser verständlich zu machen und dabei gleichzeitig eine deutliche Abgrenzung zu den Zielen der Arbeit von BRUCHNER (2004) sicherzustellen, sollen diese nun erläutert und die Vorgehensweisen bei ihrer Umsetzung kurz beschrieben werden. BRUCHNER formulierte 2004 in Kapitel 2 ihrer Arbeit folgende vier Zielsetzungen:

1. Einordnung des Forstmodells in das Produktionsmanagement

   Auf den ersten 50 Seiten ihrer Dissertation beschreibt BRUCHNER sehr detailliert, inwieweit Simulation inhaltlich dem Produktionsmanagement angehört und wie man dieses logistische Hilfsmittel auf das Arbeitsfeld „Forst“ anwenden könnte. Dabei gibt sie einen umfassenden Einblick in die Themenfelder „Produktion“, „Produktionsmanagement“ und „Produktionslogistik“.

2. Auswahl einer industriellen Simulationssoftware und Anpassung auf forstwirtschaftliche Fragestellungen zur Entscheidungsunterstützung in der technischen Holzproduktion

   In diesem Teil ihrer Forschungsarbeit beschäftigt sich BRUCHNER mit der generellen Einordnung simulationsgestützter Entscheidungsinstrumente in die Produktionsvorgänge eines Betriebes und hebt deren Nutzen bei der Planung, Steuerung und Kontrolle dieser Vorgänge hervor.
   Des Weiteren befasst sie sich intensiv mit dem Begriff „Logistik“, wobei das Hauptaugenmerk auf der „Produktionslogistik“ liegt. Gerade in diesem Arbeitsbereich lässt sich Simulation für eine Vielzahl von Aufgaben effizient nutzen, was BRUCHNER ebenfalls ausführlich unter Angabe verschiedener Beispiele darstellt.
   Schließlich formuliert sie ihre Hypothese, nach der der Einsatz einer bisher in zahlreichen anderen Industriebereichen genutzten Simulationssoftware (AutoMod) auch in der deutschen Forstwirtschaft sinnvoll und nutzbringend umgesetzt werden kann. Im Folgenden legt sie dann ihr Konzept zur Verwirklichung dieser Idee vor, wobei insbesondere Pro- und Contra-Argumente ihrer Vorgehensweise diskutiert werden.
   Einem kurzen Exkurs in das Auswahlverfahren der schließlich für die Modellentwicklung eingesetzten Software AutoMod folgen eine detaillierte Charakterisierung der Software sowie die ersten technischen Erläuterungen zur Umsetzung der gestellten Aufgabe.

3. Erstellen eines forsttechnischen Modells als Grundlage für die praktische Anwendung einer Ablaufsimulation zur Entscheidungsunterstützung in der technischen Holzproduktion

   Im Rahmen des Verbundprojektes „ZEUS[2]“ entwickelte BRUCHNER ein erstes Basismodell eines 1 ha großen Bestandes. Rückegassenabstände von exakt 20 Metern sowie Bestandesinformationen (Position, Baumart, BHD, Höhe und Volumen jedes einzelnen Baumes), die mit Hilfe des Waldwachstumssimulators SILVA generiert wurden, fließen als Daten in dieses Modell mit ein. Bei den simulierten Arbeitssystemen handelt es sich um einen Harvester (Durchführung der Holzernte) und einen Forwarder (Durchführung der Rückung).
   Die Auswahl der während der Simulation zu erntenden Bäume wird im Basismodell über die Angabe eines prozentualen Anteils der insgesamt aufstockenden Baumanzahl vorgenommen.
   Die vom Harvester produzierten Abschnitte werden im Anschluss an ihre Ablage seitlich der Rückegassen durch den Forwarder zu den dafür vorgesehenen Polterplätzen transportiert.
   Das Basismodell arbeitet auf einem insgesamt recht einfach gehaltenen Detaillevel, überzeugt aber dennoch in seiner Eigenschaft als erster Nachweis der Durchführbarkeit von Modellierungen forstlicher Strukturen und Arbeitsprozesse unter Verwendung von AutoMod.

4. Beleg der forstwirtschaftlichen Anwendungstauglichkeit der Simulationssoftware AutoMod in zwei Fällen

   Das von BRUCHNER entwickelte Basismodell erfüllt die formulierten Ansprüche, forstliche Strukturen und Produktionsprozesse abzubilden und die kalkulierten Ergebnisse der Simulation - in noch zu erweiternder Form - zur Unterstützung forstlicher Planungs- und Entscheidungsaufgaben zu verwenden.
   Die Verifizierung der simulierten Arbeitssysteme gelingt, eine Validierung ist im Hinblick auf die Komplexität und die mangelnde Verfügbarkeit qualitativ hochwertiger Datensätze nur in Teilen möglich.
   Zusammen mit HEMM (2003) entwickelt BRUCHNER als Abschluss ihrer Forschungsarbeiten ein erstes Konzept zur Erweiterung und Verbesserung des Basismodells. Dabei wird als nächster Schritt die Modellierung eines real existierenden Bestandes mit einer Größe von etwa 11 ha ins Auge gefasst.

   Zusammenfassend lässt sich sagen, dass die im Jahr 2004 fertig gestellte Arbeit von BRUCHNER eine sehr gute Ausgangsbasis für die Weiterentwicklung des bereits existierenden Modells darstellt. Welche Aufgaben im Verlauf dieser Weiterentwicklung im Detail zu bewältigen sind und welche Zielsetzungen als Richtwerte für die hier vorliegende Arbeit gelten müssen, wird im folgenden Kapitel erläutert.

[2] ZEUS = Zukunftsorientiertes Entscheidungsunterstützungssystem (Verbundprojekt des Bundesministeriums für Bildung und Forschung)

2.2 Ziele der Arbeit

Das von BRUCHNER (2004) formulierte, übergeordnete Ziel der gesamten Forschungsaufgabe hat sich auch in dieser Arbeit nicht verändert:

Übergeordnetes Ziel der hier vorliegenden Forschungsarbeit ist die Entwicklung und der Einsatz (vorerst auf Versuchsebene, später in der Praxis selbst) einer Simulationssoftware, die in der Lage ist, real existierende, forstliche Strukturen (Bestandesflächen, Erschließungssysteme und Baumkollektive) auf Ebene des einzelnen, individuell unterschiedlich ausgeprägten Baumes abzubilden und gleichzeitig innerhalb dieser Strukturen eine Auswahl in der forstlichen Praxis eingesetzter Arbeitssysteme unter Berücksichtigung ihrer individuellen Systemparameter zu modellieren und zu simulieren. Im Zuge dieser Simulation sollen für alle Arbeitssysteme in Abhängigkeit der speziellen Charakteristika der jeweiligen Bestandesszenarien Kennzahlen hinsichtlich der Dauer, der Produktivität, der Kosten, der produzierten Güter und wichtiger ökologischer Aspekte (Fahrtstrecken, Benzinverbrauch) berechnet werden, die dann im Vergleich mit realen Systemdaten auf ihre Qualität geprüft und bei ausreichender Genauigkeit zu einem späteren Zeitpunkt als Grundlage für Entscheidungs- und Planungsaufgaben in der forstlichen Praxis dienen sollen.
Zu den potenziellen Nutzern dieser Software sollen Entscheidungsträger aus der Forstwirtschaft, Waldbesitzer, Forstunternehmer, Maschinenhersteller, Wissenschaftler sowie Schüler und Studenten gehören.

In der praktischen Umsetzung erfordert diese Zielsetzung eine Weiterentwicklung des von BRUCHNER erstellten Basismodells unter Berücksichtigung folgender Aspekte:

2.2.1 Erweiterungen bei der Darstellung der Bestandesfläche, der Erschließungssysteme und der Polter

Bestandesfläche

Vorweg ist zu sagen, dass auch im Rahmen dieser Arbeit die **Bestandesebene als Grundlage der Modellentwicklung** nicht verlassen werden soll. Im Laufe der Entwicklungsarbeiten hat sich herausgestellt, dass aufgrund der Datenverfügbarkeit und -handhabung diese forstliche Flächeneinheit am besten für eine Abbildung in AutoMod geeignet ist. Dies schließt allerdings nicht die Ausweitung der modellierten Flächen auf die Größenordnung von Bestandeskollektiven oder der Abbildung ganzer Forstbetriebe zu einem späteren Zeitpunkt aus.
Das von BRUCHNER entwickelte Basismodell bezieht sich in seiner Darstellung lediglich auf eine quadratische Fläche von 1 ha. In der forstlichen Praxis sind Bestände dieser Größenordnung und in dieser Form zwar durchaus existent, in der Regel liegen die Dimensionen eines zusammenhängenden Bestandes aber deutlich über diesem Wert und variieren die Verläufe der Grenzlinien enorm. Daher ist

es notwendig, die **Flächengröße** des in dieser Arbeit zu entwickelnden Bestandesmodells **auszuweiten** und gleichzeitig einen Flächentyp auszuwählen, dessen **Abgrenzungen nicht schematisch** verlaufen.

Erschließungssystem

Im Hinblick auf das Erschließungssystem wählte BRUCHNER einen Bestand aus, dessen Forststraßen und Rückegassen in einem festen Abstand von 20 Metern ebenfalls sehr schematisiert verlaufen. Auch in diesem Fall gilt: Gassensysteme dieser Art existieren in der Praxis, in vielen Beständen ist ihr Verlauf aber weit weniger mit einem Entwurf am Reißbrett vergleichbar. Der darzustellende Bestand soll demnach über **ein Erschließungssystem** verfügen, **das weitläufiger und variantenreicher gestaltet ist**.
Ferner muss gewährleistet sein, dass ein potenzieller Nutzer – wie in der Praxis auch – problemlos in der Lage ist, das **Gassensystem frei zu verändern**. Das Hinzufügen oder Entfernen einzelner Gassen oder kompletter Wegenetze muss durchführbar sein.

Polter

Die **Anzahl an Poltern** im Modell soll für den Nutzer **selbst** zu **bestimmen** sein. Sie müssen **an jeder Position im Modell** eingerichtet und je nach Notwendigkeit **aktiviert oder deaktiviert** werden können. Auf diese Weise lassen sich tatsächlich auftretende Probleme wie die schlechte Erreichbarkeit oder die vorübergehende maximale Auslastung eines bestimmten Polterplatzes simulieren.

2.2.2 Erweiterungen bei der Darstellung des aufstockenden und des zu erntenden Bestandes

Der Einsatz des Waldwachstumssimulators SILVA zur Berechnung einzelbaumbezogener Informationen über Position, Baumart, BHD und Höhe wurde von BRUCHNER erfolgreich für die Generierung des auf der 1 ha großen Fläche stockenden Bestandes eingesetzt. Bisher war SILVA nur in der Lage, Baumkollektive mit einer Größe von wenigen Hektar zu erzeugen. Für einen in dieser Arbeit zu modellierenden Bestand muss also ein Weg gefunden werden, die **Daten einzelner Bäume für eine Bestandesfläche**, die **größer als 1 ha** ist, zu ermitteln.

Die Auswahl der zu erntenden Bäume erfolgt in BRUCHNERS Modell über die Angabe eines Prozentanteils der insgesamt aufstockenden Baummenge. Werden beispielsweise 30 % dieser Bäume für die Ernte bestimmt, geschieht dies lediglich anhand einer Zufallsauswahl. Waldbauliche Richtlinien und Aspekte spielen dabei keine Rolle, eine Vorgehensweise, die es in der forstlichen Praxis in dieser Form nicht gibt.
Allerdings ist es im Programm SILVA möglich, eine waldbaulich begründete und somit forstwirtschaftlich „sinnvolle“ Auswahl der Erntebäume zu simulieren. In diesem Fall werden aus dem

generierten Baumkollektiv bestimmte Bäume aufgrund ihrer Position und ihrer Wuchsleistung für eine Entnahme markiert. Da die SILVA-Daten bereits für die Modellierung des Bestandes in AutoMod verwendet werden, **muss ein Weg gefunden werden**, die **Information über Entnahme oder Verbleib für jeden einzelnen Baum** ebenfalls **in das Modell zu überführen**. Auf diese Weise könnten verschiedene Pflege- bzw. Endnutzungseingriffe simuliert werden.

Jeder Baum wird im Zuge der Holzernte entastet und in Stämme oder Stammabschnitte aufgeteilt. BRUCHNER setzte dieses Vorgehen um, indem sie die Erntebäume im Basismodell als vollholzige, zylinderförmige Stämme definierte, die dann während der Ernte in gleichlange, mit dem gleichen Volumen ausgestattete „Abschnitte“ umgewandelt werden. Diese Abstraktion der Darstellung ohne Berücksichtigung der individuellen Abholzigkeit der Stämme ist unter den damals gegebenen Bedingungen eines Erstversuches zulässig, weicht aber deutlich von den realen Verhältnissen im Forst ab.
Daher ist es unerlässlich, dem genannten Ziel der Abbildung tatsächlich existierender Strukturen insoweit gerecht zu werden, als dass **die im Rahmen der vorliegenden Arbeit modellierten Stämme und Stammabschnitte in ihren Eigenschaften (Qualität, Durchmesser, Länge, Abholzigkeit, Volumen) denen im Wald gleichen**. Diese Voraussetzung sowie eine Zuordnung der einzelnen Stammabschnitte zu demjenigen Baum, aus dem sie während der Holzernte „entstehen“, muss das Modell leisten können.

Wird ein Bestand zum ersten Mal erschlossen oder werden innerhalb eines bestehenden Erschließungssystems weitere Rückegassen hinzugefügt, so sind diese Arbeiten immer gleichbedeutend mit einem Aufhieb der neuen Gassen. Das bedeutet, dass zahlreiche Bäume, unabhängig waldbaulicher Kriterien, zusätzlich geerntet werden müssen. Dieser Mehraufwand muss im neu zu entwickelnden Modell darstellbar sein. Ein **Nutzer** des Modells **soll in der Lage sein**, beispielsweise an bestimmten Stellen im Bestand **dem bestehenden Erschließungssystem zusätzliche Rückegassen hinzuzufügen** und im Endergebnis vergleichen zu können, welchen **ökonomischen oder planerischen Nutzen** diese neuen Gassen für ihn haben könnten.

Wünschenswert ist neben den oben genannten Zielsetzungen auch eine **Möglichkeit**, die weitere **Entwicklung eines Bestandes über längere Zeiträume hinweg darstellen** zu können. Auswirkungen heutiger Holzerntemaßnahmen auf zukünftige Eingriffe ließen sich dadurch darstellen. Der Einfluss auf die Sortimentierung würde sichtbar, was wiederum einen Effekt auf die Auswahl der einzusetzenden Arbeitssysteme hat. An diesem Punkt könnten entsprechende Darstellungsmöglichkeiten des Simulators SILVA eingesetzt werden.

2.2.3 Erweiterungen bei der Darstellung der Arbeitssysteme

Bisher „arbeiten“ im Basismodell die Systeme Harvester (Holzernte) und Forwarder (Rückung). Im Rahmen der Planungen für das aktuelle Modell wird entschieden, **zusätzlich** noch **die Systeme Motormanuelle Holzernte (Holzernte), Schlepper (Vorrückung + Rückung) und Pferd (Vorrückung)** in das Modell **zu integrieren**. Für alle drei Systeme müssen entsprechende Leistungskennzahlen ermittelt werden, die es im weiteren Verlauf auf ihre Verwendbarkeit im Modell hin zu überprüfen gilt. Die Implementierung dieser zusätzlichen Arbeitsverfahren würde einen großen Schritt in Richtung einer wesentlich breiteren Anwendbarkeit des Modells auf unterschiedlichste wissenschaftliche Fragestellungen ermöglichen. Die **Kombination einzelner Verfahren** sollte dabei ebenfalls durchführbar sein.

Für die Berechnung der einzelbaumbezogenen Leistung der Systeme Harvester und Forwarder bediente sich BRUCHNER spezieller Produktivitätsformeln. Die Kalkulation der Dauer für die Ernte eines Baumes erfolgte beim Harvester mit Hilfe einer Formel für die Berechnung der Dauer für das Positionieren des Aggregats sowie einer weiteren Formel für die Berechnung der Dauer für das Fällen und Aufarbeiten des Stammes. Als Eingangsgröße für die zweite Formel dient im Wesentlichen das Volumen des gesamten Baumes. Allerdings könnte man durch Berücksichtigung des Volumens jedes einzelnen Abschnittes, den der **Harvester** produziert, noch präzisere Ergebnisse erhalten, da es letztlich die Art der gewünschten Abschnitte ist, die die Arbeit der Maschine beeinflusst. Im hier zu entwickelnden Modell soll versucht werden, diesen Effekt auf der Basis **neuer Formeln** darzustellen.
Bei der Kalkulation des Zeitverbrauchs des **Forwarders** wurde in Ermangelung geeigneter Formeln jeweils eine spezielle Dreiecksfunktion[3], die die Dauer eines Be- bzw. eines Entladevorgangs im Rahmen bestimmter Grenzen zufällig bestimmt, verwendet. Es soll versucht werden, **neue Formeln** für diese Arbeitsprozesse zu finden und in das Modell zu implementieren, um eine **präzisere Berechnung der Kennzahlen** für dieses Arbeitssystem zu gewährleisten.

Einen wesentlichen Anteil an der **Leistung** eines eingesetzten Arbeitssystems hat der **Maschinen- bzw. Pferdeführer** (PURFÜRST, 2004). Seine Arbeitsweise, die durch Erfahrung sowie individuelle Eignung und Motivation geprägt ist, bestimmt, ob ein System besonders produktiv arbeitet oder nicht. Dieser entscheidende Faktor soll im neuen Modell in Form des so genannten „**Zeitgrades**[4]“

[3] Liegen keine gemessenen Werte zu einem Verfahrensabschnitt vor, sondern nur relativ stark variierende Erfahrungsgrößen, kann in einer Dreiecksfunktion ein Minimum, ein höchst wahrscheinlicher Wert und ein Maximum festgelegt werden, um die wahrscheinlichste Dauer eines Vorgangs zu definieren. Der Einsatz einer Dreiecksfunktion ist eine gängige Methode, um auftretende Ereignisse mittels weniger Eckdaten in eine Simulation einzubinden. Dabei werden während der Simulation im Bereich zwischen Minimum und Maximum liegende Werte zufällig ausgewählt, die sich dabei aber überwiegend in der Größenordnung des wahrscheinlichsten Wertes bewegen. Stehen zu einem späteren Zeitpunkt präzisere Daten zur Verfügung, kann die Dreiecksfunktion aktualisiert oder ersetzt werden (VISSER, 2003).

[4] Zeitgrad: Das in Prozent ausgedrückte Verhältnis zwischen Vorgabezeit und tatsächlich verbrauchter Zeit. Die Vorgabezeit ist diejenige Zeit, die der EST für die Durchführung einer bestimmten Holzerntetätigkeit vorgibt (LÖFFLER, 1991).

berücksichtigt werden. Für jedes Arbeitssystem soll der Nutzer die Möglichkeit haben, einen Fahrer/Führer mit normaler, überdurchschnittlicher oder schwacher Leistung zu simulieren.

Innerhalb des 1 ha großen Basismodells von BRUCHNER bewegen sich die **Maschinen** Harvester und Forwarder bei ihrer „Arbeit“ nach dem **Prinzip des nächst gelegenen Baumes bzw. Stammabschnitts** vorwärts. Erreicht der Harvester beispielsweise einen Erntebaum, verbleibt er solange an dieser Position, bis die berechnete Zeit für das Fällen und Aufarbeiten vergangen ist. Im Modell werden dann die „produzierten“ Abschnitte erzeugt und am Stammfußpunkt des Erntebaumes positioniert. Im Anschluss wird vom Programm überprüft, wo derjenige Erntebaum im Modell steht, der sich am nächsten zur aktuellen Position des Harvesters befindet. Ist dieser Baum gefunden, setzt sich der Harvester in Bewegung und steuert dieses neue Ziel an. Beim Forwarder verhält es sich genauso. Diese Art der Fortbewegung führte im Modell von BRUCHNER dazu, dass beide Maschinen U-förmig durch den Bestand fuhren, was sicherlich der tatsächlichen Fahrtrouten-Wahl auf einem relativ schematisch angeordneten Gassennetz wie diesem entspricht.
Das Verfahren des „nächsten Baumes bzw. Stammabschnitts“ funktioniert zwar auch in größeren Beständen mit einem eher zufällig angeordneten Erschließungssystem, dort führt es aber – wie der Autor bei speziellen Untersuchungen herausfand - zu einer völlig unrealistischen Routenwahl der Maschinen. Es ist somit notwendig, dem **Nutzer** des neuen Modells die Möglichkeit einzuräumen, die **Fahrtroute der Maschinen selbst festzulegen**.

Unterbrechungen durch persönlich und sachlich bedingte Verteilzeiten sind bei jedem praktischen Holzernteeingriff Normalität. BRUCHNER berücksichtige diese Tatsache, indem sie erneut Dreiecksfunktionen einsetzte, die während der Simulation eine Unterbrechung mit einer im Rahmen der maximalen und minimalen Richtwerte liegenden, zufällig bestimmten Dauer simulierte.
Im neuen Modell soll es aus Gründen einer erhöhten Präzision bei der Simulation möglich sein, **durch den Nutzer eine bestimmte Gesamtlänge der auftretenden Unterbrechungen,** bezogen auf die Gesamtarbeitszeit (GAZ) **festzulegen**, die dann in die Simulation in Form von dynamisch berechneten, mehrfach auftretenden Pausen einfließt. Beispielsweise lassen sich so unterschiedlich alte Maschinentypen simulieren (ältere Maschinen = höhere Störanfälligkeit und umgekehrt).

Für das System **Forwarder** sollen dem Modell **zusätzliche Fahrgeschwindigkeiten** hinzugefügt werden. BRUCHNER definierte in ihrem Modell zum einen eine „Fahrgeschwindigkeit unbeladen“ und eine „Fahrgeschwindigkeit beladen“. Im neuen Modell soll des Weiteren zwischen der Art des aktuell befahrenen Weges (Forststraße oder Rückegasse) und dem Beladezustand unterschieden werden. Außerdem soll noch die Fahrgeschwindigkeit der so genannten „Arbeitsfahrt“ während des Beladevorgangs auf der Rückegasse einstellbar sein. Diese Erweiterung erhöht ebenfalls die Genauigkeit der Simulation.

Verschiedene Sortimente (Stammabschnitte) verfügen über verschiedene Eigenschaften. So besitzt beispielsweise das Sortiment „LPZ 5 m“ (Profilzerspaner 5 Meter lang) eine andere Länge, einen anderen Durchmesser und somit ein anderes Volumen als das Sortiment „IS 2 m“ (Industrieholz 2

Meter lang). Diese verschieden dicken und verschieden langen Abschnitte „verhalten“ sich beim Auffüllen des Rungenkorbes während des Ladevorgangs des Forwarders sehr unterschiedlich. Ist dieser Stauraum der Maschine gefüllt, fährt sie automatisch zum nächsten Polter, um sich zu entladen. Allerdings besteht aufgrund der „Höhlenbildung“ (Kavernen) zwischen den Stammabschnitten ein erheblicher Unterschied zwischen dem Ladezustand eines Rungenkorbes der mit dem Sortiment „LPZ 5 m“ oder dem Sortiment „IS 2 m“ beladen ist. Beim Sortiment „IS 2 m“ wird sich eine deutlich höhere Stückzahl an Abschnitten im Korb befinden als beim Sortiment „LPZ 5 m“. Das bedeutet aber, dass sich bei einer größeren Stückzahl auch eine viel größere Anzahl an Kavernen zwischen den Abschnitten bildet und somit viel mehr Stauraum ungenutzt bleibt als beim Sortiment „LPZ 5 m“. Diese Tatsache soll im neuen Modell in Form eines vom Nutzer pro anfallendes Sortiment einstellbaren „**Volumenfaktors**“ berücksichtigt werden, der einen gewissen Volumen-Prozentsatz auf die einzelnen Abschnitte aufschlägt bzw. ihr Volumen entsprechend reduziert. Andernfalls würde im Modell während der Simulation davon ausgegangen, dass der Forwarder mit einer Fuhre „LPZ 5 m“ und mit einer Fuhre „IS 2 m“ immer 10 fm transportieren könnte. Dies ist faktisch aber nicht der Fall.

In der Praxis kann der Fahrer eines **Forwarders** individuell bestimmen, ob er – in Abhängigkeit der Länge der einzelnen Abschnitte der anfallenden Sortimente – **sortenrein**, also jedes Sortiment nacheinander, **oder sortengemischt**, also Abschnitte unterschiedlicher Sortimente gemeinsam rücken möchte. Die Entscheidung hat Einfluss auf die Häufigkeit der Befahrungen des Bestandes und damit auf die Dauer des gesamten Rückeprozesses. Im Modell soll es dem Nutzer überlassen bleiben, diese Entscheidung ebenfalls selbstständig zu treffen, indem er bestimmte Sortimente in so genannten „**Sortengruppen**“ zusammenfasst.

Zusätzlich soll der Nutzer auch die Möglichkeit haben, die **maximale Kapazität der Greifzange** sowie die **maximale Reichweite des Greifarms** des Forwarders einzustellen.

Für die Arbeitssysteme Harvester, Forwarder und Schlepper sollen nach dem international gültigen Schema der FAO (Food and Agriculture Organization of the United Nations) individuell ausfüllbare **Maschinenkostenkalkulationen** integriert werden, die es dem Nutzer erlauben, einen speziell auf die zu simulierende Maschine bezogenen Kostensatz in Euro pro Maschinenarbeitsstunde (MAS) zu berechnen.

Ebenso soll eine **Maschinendatenbank** im neuen Modell hinterlegt sein, die – einmal ausgefüllt – es dem Nutzer erleichtert, verschiedene Einstellungen für unterschiedliche Maschinentypen zu hinterlegen und per Knopfdruck in das Modell einzulesen.

Das Modell soll in Echtzeit rechnen, d.h. es werden reale 24-Stunden-Tage simuliert. Um die Arbeit der Maschinen den tatsächlichen Gegebenheiten anzupassen, soll ein **Schichtmodell mit der Option auf Einstellung individueller Pausenzeiten** im Modell integriert werden. Der Nutzer kann dann problemlos einen Ein- oder Mehr-Schicht-Betrieb inklusive Frühstück und Mittagspause simulieren.

2.2.4 Erweiterungen bei der Ergebnis-Präsentation und der graphischen Darstellung der Simulation

BRUCHNER hat für das Basismodell bereits eine sehr ausführliche Präsentation der während der Simulation berechneten **Ergebnisse** entwickelt. Dieser soll nun noch eine **Darstellung der Ergebnisse aufgeteilt nach Baumart, Sortimenten und Sortengruppen** für alle fünf verschiedenen Arbeitssysteme hinzugefügt werden.

Bei der visuellen Darstellung während des Ablaufs der Simulation sollen **neue Graphiken für die unterschiedlichen Arbeitssysteme** entwickelt und in das Modell implementiert werden.
Außerdem muss der Nutzer im Hinblick auf die Rechenzeiten des Computers in der Lage sein, eigenständig zu bestimmen, ob während des Ablaufs der graphisch unterstützten Simulation **nur die zur Ernte vorgesehenen oder alle auf der Fläche stockenden Bäume angezeigt werden sollen**.
Ebenfalls neu hinzukommen soll die **Abbildung individueller Proportionen bei den Baum-Graphiken** (Stammdurchmesser, Höhe) sowie eine **farbliche Differenzierung der produzierten Sortimentsabschnitte**.
Zu guter letzt soll den **Polter-Symbolen** eine **Anzeige über den aktuellen „Inhalt“** jedes einzelnen Polters zur Seite gestellt werden.

Die Umsetzung sämtlicher, in diesem Kapitel genannten Ziele würde das neu entstandene Modell einen erheblichen Schritt näher an die übergeordnete Zielsetzung des Forschungsfeldes „Simulation forstlicher Strukturen und Systeme“ heran führen. In den folgenden Kapiteln wird nun, ausgehend von der Modellierung der Bestandesfläche, der Erschließungssysteme und des aufstockenden Bestandes, die Vorgehensweise zur Umsetzung der gewählten Entwicklungsstrategien ausführlich beschrieben.

3 Die Projekte und die Software

3.1 Die Projekte

Die Projekte, die die Entwicklung eines Konzeptes sowie dessen Umsetzung zur Erstellung des Modells eines real existierenden Testbestandes aus dem Forstamt Paderborn zum Ziel hatten, wurden von der **Landesanstalt für Ökologie, Bodenordnung und Forsten** (LÖBF) des Landes Nordrhein-Westfalen finanziert.

Im Zeitraum von Anfang 2003 bis Ende 2006 wurde im Rahmen dieser Projekte am **Lehrstuhl für Forstliche Arbeitswissenschaft und Angewandte Informatik** der **TU München** in Kooperation mit der Firma **SimPlan Integrations** aus Witten ein entsprechendes Modell des Testbestandes erstellt, das im Anschluss verifiziert und für zahlreiche wissenschaftliche Versuche eingesetzt werden konnte.

Lehrstuhl für Forstliche Arbeitswissenschaft und Angewandte Informatik Leitung: Herr Prof. Dr. Walter Warkotsch Am Hochanger 13 85354 Freising Tel.: +49(0)8161/714761 Fax.: +49(0)8161/714767 www.forst.wzw.tum.de/EXT/LST/AWINF Mail: arbwiss@forst.tu-muenchen.de	**SimPlan Integrations GmbH** Geschäftsführer: Herr Dr.-Ing. Axel Radtke, Herr Jörg Kemper Friedrich-Ebert-Str. 87 D - 58454 Witten Tel.: +49(0)2302/202970 Fax: +49(0)2302/2029719 www.simplan.de Mail: Axel.Radtke@SimPlan.de

Landesanstalt für Ökologie, Bodenordnung und Forsten NRW Leitung: Präsident Herr Rolf Kalkkuhl Leibnizstrasse 10 45659 Recklinghausen Tel.: +49(0)2361/3050 Fax: +49(0)2361/305700 www.loebf.nrw.de Mail: poststelle@loebf.nrw.de	**Technische Universität München** Leitung: Präsident Prof. Herr Wolfgang A. Herrmann Arcisstrasse 21 80333 München Tel.: +49(0)89/28901 Fax: +49(0)89/28922000 www.tum.de Mail: info@tum.de

3.2 Die Simulationssoftware AutoMod

Verkürzte Produktlebenszyklen, ständige Veränderungen des Marktes und hohe Ansprüche der Kunden bedeuten steigenden Wettbewerbsdruck (SCHÖNSLEBEN, 2000; WIRTH, BAUMANN, 2001). Insbesondere dynamische Effekte und Fragestellungen wie z. B. die maximale Kapazität des Gesamtsystems, Pufferbelegung, Störungsverhalten und Arbeitszeitmodelle können nur mit großer Unsicherheit prognostiziert werden (CLAUSEN, 2002). Eine optimal strukturierte Aufbau- und Ablauforganisation sichert effiziente und reibungslose Unternehmensabläufe, die kurze Reaktionszeiten ermöglichen (KÄMPF, GIENKE, 2002). Häufig werden erst im Betrieb eines Systems Problemstellungen erkannt, deren Behebung dann mit sehr hohen Kosten verbunden sein kann.

Simulation ist ein Werkzeug, um die Auswirkungen geplanter Maßnahmen innerhalb eines betriebswirtschaftlichen Systems zu untersuchen. AutoMod bietet mit seinem Simulationskern eine Vielzahl von Einsatzmöglichkeiten. Diese reichen von der Modellierung von Herstellungsprozessen über Lagersimulation und Supply Chain-Simulationen bis hin zur Online-Kopplung. Da die Software schon seit 15 Jahren auf dem Markt ist, konnten bisher viele Bereiche an die zahlreichen Bedürfnisse der Anwender angepasst werden. Firmen wie Daimler-Chrysler, BMW oder Siemens nutzen AutoMod schon seit längerem zur Produktionsplanung. Die Betonung liegt bei AutoMod nicht nur auf Rechenleistung, sondern auch auf der immer wichtiger werdenden Visualisierung von Arbeitssystemen. Damit kann die Kommunikation zwischen Management, Produktion und Stab wesentlich verbessert werden. Die Modellierung erfolgt dabei interaktiv mit Hilfe graphischer Unterstützung. Komplexe Steuerungen und Abläufe können mit Hilfe einer eigenen Programmiersprache abgebildet werden. Sowohl im laufenden Prozess in Echtzeit, als auch in der Planungsphase vor Inbetriebnahme im Zeitraffverfahren, können mit der Simulation Systeme analysiert und optimiert werden (BANKS, 1998 und BANKS, CARSON, NELSON, 1999).

Die Simulationssoftware AutoMod besteht aus drei Hauptmodulen:
Die Erstellung des Simulationsmodells findet im **Modelleditor** (edit environment) statt, in dem das Modell aus mindestens zwei Systemen, dem Förder- und dem Prozesssystem, gebildet wird. Das Fördersystem beinhaltet alle zum Fördern von Gütern und Teilen notwendigen Anlagenteile (im Forstmodell besteht das Fördersystem aus einem Forststraßen- und Rückegassennetz). Im Prozesssystem erfolgt u.a. die Definition der Fördergüter (im Forstmodell: Bäume und deren Sortimente), Ressourcen (Personal und Maschinen), Auftragslisten, Variablen, Tabellen und der Durchlaufpläne. In den Durchlaufplänen ist für jedes Fördergut die zuvor durch den Nutzer individuell festgelegte Bearbeitungsreihenfolge und der Transportweg durch das Modell festgehalten. Das Prozesssystem enthält somit die Steuerung der gesamten Anlage. Wenn der Modellierungsvorgang abgeschlossen ist, wird das Modell von einem Compiler übersetzt, anschließend in das **Simulationsmodul** (simulation environment) geladen und dann gestartet (KUDLICH, 2001). Ablaufende Simulationsprozesse sind durch Vorgänge und Funktionen beschrieben, die in einer

speziellen, C-nahen AutoMod-Programmiersprache geschrieben werden. Ein Auszug aus dem Quellcode[5] des Systems Harvester ist in Abbildung 2 zu sehen.

```
/* Holz ernten */
if theLoad type = L_Nadelbaum then begin

    print "path_mov_dtl:" theLoad A_Baum_BezugsGasse to V_dummyStr
    print V_Forw_GassenBlock to V_dummyStr2
    print V_Schlepp_GassenBlock to V_dummyStr3

    /* ist die gasse des stammes belegt? */
    if V_dummyStr <> V_dummyStr2 and V_dummyStr <> V_dummyStr3 then begin

        print "path_mov_dtl:" theLoad A_Baum_BezugsGasse to V_dummyStr
        print V_Harv_Gassenreihenfolge(V_Harv_AktGasse) to V_dummyStr2

        /* falls es nicht die erlaubte Gasse ist */
        if V_dummyStr <> V_dummyStr2 then
            return false

        /* sofern er nicht auf einem Hauptweg ist, die Gassen sperren */
        if theLoad A_Baum_BezugsGasse substring(1,8) <> "hauptweg" then begin
            set V_Harv_GassenBlock to theLoad A_Baum_BezugsGasse
        end
```

Abbildung 2: Auszug aus dem Quellcode des Systems Harvester der Software AutoMod

Im Simulationsmodul wird das Modell dreidimensional mit interaktiv veränderbarem Beobachtungsstandpunkt und variabler Blickrichtung visualisiert. Während des Simulationslaufs und nach dessen Beendigung werden die Ergebnisse als Diagramme oder Tabellen in einem **Statistikmodul** (model statistics) ausgegeben (BRUCHNER, 2004).

Die Anwender der Software werden keine Simulationsexperten sein. Deshalb muss der Anwender durch Eingabemasken unterstützt und möglichst von allen simulationsspezifischen Aufgaben entlastet werden. Hierzu wird für den Nutzer eine Schnittstelle zu dem Officeprogramm Access der Firma Microsoft geschaffen, in dem eigens eine Eingabemaske entwickelt wird, in der die Werte der einzelnen Simulationsparameter bezüglich dem Bestand und der Maschinenkonfiguration und -parametrisierung variiert werden können.

In den Kapiteln 4 und 5 wird die genaue Vorgehensweise zur Gewinnung und Implementierung der notwendigen Bestandes- und Systemdaten erläutert. Das Kapitel 6 beschreibt die Verifizierung der einzelnen Funktionen der forstlichen Arbeitssysteme, bevor in den Kapiteln 7 bis 9 schließlich umfangreiche Versuche mit dem erstellten Modell durchgeführt werden. Das sich anschließende Kapitel 10 handelt ebenfalls von einer Versuchsreihe, die allerdings in diesem Fall speziell aus Gründen der Modell-Validierung stattfindet. Den Abschluss bildet Kapitel 11, das die erzielten Ergebnisse einer kritischen Betrachtung unterzieht und mit einem Ausblick auf die potenziellen Einsatzgebiete und die möglichen Weiterentwicklungen der Software endet.

[5] Unter dem **Quelltext** oder auch **Quellcode** (engl. source code) oder **Programmcode** versteht man in der Informatik den für Menschen lesbaren in einer Programmiersprache geschriebenen Text eines Computerprogramms (WIKIPEDIA, 2006).

4 Datengewinnung und Datenaufbereitung

Die zur Erstellung eines Holzerntemodells notwendigen Informationen lassen sich in vier Gruppen aufteilen:

- Informationen über die **Bestandesfläche**
- Informationen über das **Erschließungssystem** im Forst
- Informationen über den **aufstockenden Bestand**[6]
- Informationen und Leistungskennzahlen der für eine Simulation vorgesehenen **Arbeitssysteme**

4.1 Die Bestandesfläche

Als Ausgangsbasis für das Holzerntemodell gilt die Bestandesfläche. Diese muss zumindest in ihren Begrenzungen in digitaler Form vorliegen. Für das aktuell zu erstellende Modell wird ein **Auszug aus dem digitalen Geländemodell (DGM)** des entsprechenden Testbestandes (s. Abbildung 3) genutzt.

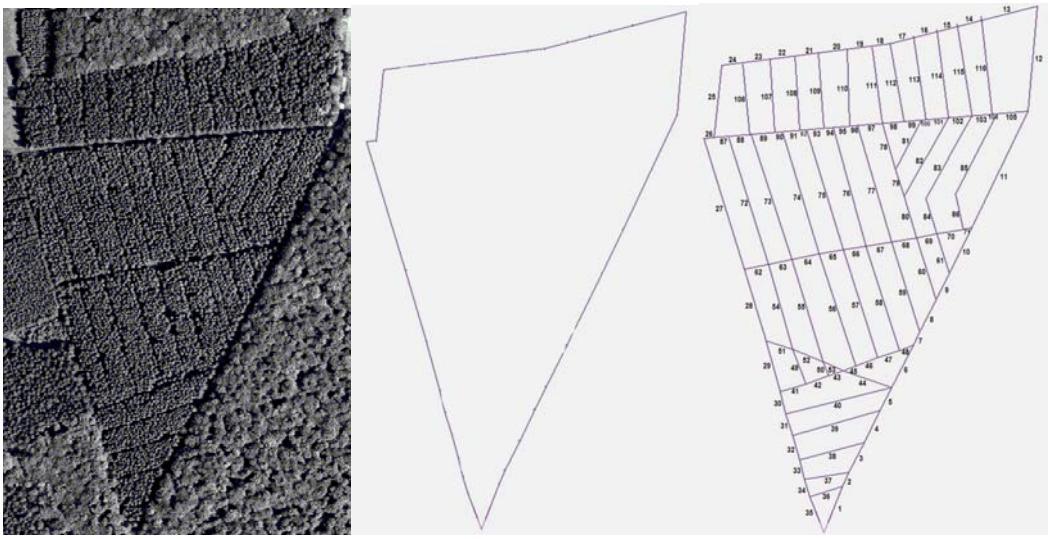


Abbildung 3: Luftbild, Bestandesbegrenzungen (GIS) und nummeriertes Rückegassennetz (GIS) eines Testbestandes

In einem Geographischen Informationssystem (GIS) werden daraus die Bestandesgrenzen im zweidimensionalen Format extrahiert und mit ihren Koordinaten durch Umrechnung auf ein lokales Koordinatensystem in AutoMod überführt werden. Sie dienen als Grundlage und Orientierungshilfe für den Einbau der Erschließungslinien. Alternativ könnte eine, an das Original angenäherte Fläche auch manuell in einem CAD oder GIS gezeichnet und anschließend in AutoMod übertragen werden.

[6] Der aufstockende Bestand beschreibt die Gesamtheit der aktuell auf der entsprechend ausgewählten Waldfläche stehenden (stockenden) Bäume.

Sollen, wie in diesem Fall, mehrere Bestände in einem Modell dargestellt werden, müssen die einzelnen Flächen entsprechend unterschiedlich in AutoMod definiert werden (z.B. „Abteilung A1“ und „A2“). Eine Zuteilung der Bäume zu einer Fläche ist dann möglich (vgl. Kapitel 4.3.2).

4.2 Gewinnung und Aufbereitung der Daten des Erschließungssystems inkl. Polterplätze

Um in einem Modell die tatsächlichen Gegebenheiten eines einzelnen Bestandes oder eines Kollektivs von Beständen möglichst realitätsnah abzubilden, ist es notwendig, Informationen über das Wege- und Gassensystem der entsprechenden Fläche zu sammeln und auszuwerten. Diese setzen sich zusammen aus:

- Definition der jeweiligen Erschließungslinie als **Forststraße**[7] oder **Rückegasse**[8]
- GIS-taugliche **Koordinaten des Start-, Endpunktes** jeder Forststraße oder Rückegasse bzw. im Falle eines Richtungswechsels innerhalb dieser Straße oder Gasse ihrer **einzelnen Segmente**
- Aussagen über die **Länge** einer entsprechenden Erschließungslinie
- GIS-taugliche Koordinaten der **Polterplätze**[9]

Um erste Informationen über das Erschließungssystem zu erhalten, sollten folgende Quellen abgefragt werden:

- **Luftbildaufnahmen** zur ersten Orientierung (s. Abbildung 3)
- **Forstbetriebskarten** der entsprechenden Flächen inkl. Forststraßen, bevorzugt in digitaler Form
- **Besprechung und Begehung** der Flächen mit bzw. unter Einweisung des zuständigen Revierförsters

Informationen zu den Forststraßen sind im Regelfall relativ problemlos zu erhalten. Dagegen wird es erfahrungsgemäß schwieriger, Datenmaterial über das Rückegassensystem zu finden.

[7] Forststraßen sind gut ausgebaute und befestigte Zufahrten und Transportwege für die Forstwirtschaft, notwendig für die Pflege des Waldes und die Bringung des Holzes (DIETZ, KNIGGE, LÖFFLER, 1999).

[8] Rückegassen sind unbefestigte Erschließungslinien, die direkt durch einen Bestand verlaufen und im Regelfall in eine Forststraße münden. Sie dienen den Holzernte- und Rückemaschinen während ihrer Arbeit als Fahrweg (DIETZ, KNIGGE, LÖFFLER, 1999).

[9] Polterplätze sind Holzlagerplätze, die zumeist in unmittelbarer Nähe zum beernteten Bestand an einer Forststraße gelegen sind. Hier werden die geernteten Stämme oder Abschnitte bis zu ihrem Abtransport zwischengelagert (DIETZ, KNIGGE, LÖFFLER, 1999).

4.2.1 Definition der Erschließungslinien

Wie bereits erwähnt, lassen sich die im Wald vorkommenden Erschließungslinien in so genannte „Forststraßen“ und „Rückegassen“ unterteilen. Diese Definitionen sind wichtig, da sich eine Maschine bei der Befahrung dieser Linien unterschiedlich verhält. Beispielsweise fährt ein Harvester im Normalfall auf einer Forststraße deutlich schneller als auf einer Rückegasse. Im Modell ist es somit unumgänglich, die verschiedenen „Fahrbahnkategorien“ zu unterscheiden, um ihnen in einem zweiten Schritt unterschiedliche Fahrgeschwindigkeiten zuzuordnen. Erreicht die Maschine bei ihrer Fahrt eine entsprechende Straße oder Gasse, bewegt sie sich auf dieser im zuvor durch den Nutzer der Software definierten Fahrtempo. Dadurch wird ein realitätsnaher Zeitverbrauch beim Befahren von Forststraßen und Rückegassen garantiert.

Für die Arbeitssysteme Harvester und Forwarder gelten dabei folgende Werte (s. Tabelle 1):

Tabelle 1: Fahrgeschwindigkeiten für die Systeme Harvester und Forwarder in Abhängigkeit des Erschließungssystems (Quelle: POHL, 2006)

Fahrgeschwindigkeiten [km/h]	Harvester	Forwarder
Geschwindigkeit auf der Forststraße	10.0	---
Geschwindigkeit auf der Rückegasse	2.6	---
Fahrgeschwindigkeit beladen auf der Forststraße	---	6.8
Fahrgeschwindigkeit unbeladen auf der Forststraße	---	7.8
Fahrgeschwindigkeit beladen auf der Rückegasse	---	3.9
Fahrgeschwindigkeit unbeladen auf der Rückegasse	---	4.1
Fahrgeschwindigkeit während des Ladevorgangs auf der Rückegasse (Arbeitsfahrt)	---	3.0

Beim System Harvester müssen lediglich zwei verschiedene Fahrgeschwindigkeiten für Forststraßen und Rückegassen definiert werden. Beim System Forwarder wird neben dem „Fahrbahntyp“ zusätzlich auch der Ladezustand der Maschine sowie die Art der Tätigkeit berücksichtigt. So gelten für das beladene und das unbeladene Fahren auf Forststraßen und Rückegassen insgesamt vier unterschiedliche Geschwindigkeiten.
Hinzu kommt die Frage, ob der Forwarder, so er denn auf einer Rückegasse fährt, mit Ladearbeiten beschäftigt ist oder ob er die Gasse nur befährt, um möglichst schnell von Punkt A nach Punkt B zu kommen. Die während des Ladevorgangs auftretenden, oftmals sehr kurzen Fahrbewegungen zwischen den einzelnen Stammabschnitten, die nach der Ernte durch den Harvester an einer Rückegasse abgelegt werden, bezeichnet man dabei als „Arbeitsfahrt“. Ihnen wird ebenfalls eine gesonderte Fahrgeschwindigkeit zugeordnet.

Den Arbeitssystemen Motormanuelle Holzernte, Schlepper und Pferd müssen keine Fahrgeschwindigkeiten zugeordnet werden. Für sie gelten bei der Fortbewegung andere Gesetzmäßigkeiten, da in allen drei Fällen spezielle Tarife zur Berechnung der individuellen Leistung

im Modell eingesetzt werden, bei denen die Fahrt- bzw. Wegezeiten bereits als konstanter Wert enthalten sind. Näheres dazu wird in Kapitel 5 erläutert.

Forststraßen und Rückegassen sind im gesamten Modell mit einer **Breite von 4,50 Metern** definiert. Dieser Wert entspricht normalerweise den in deutschen Wäldern auftretenden Gegebenheiten.

4.2.2 Gewinnung GIS-tauglicher Koordinaten von Start-, End- und Schnittpunkten der Erschließungslinien sowie der Polterplätze

Nach abgeschlossener Definition der Forststraßen und Rückegassen, sind diese im Einzelnen genauer zu spezifizieren. Jede Straße oder Gasse wird anhand folgender Parameter definiert:

- Start- und Endpunkt
- ggf. Schnittpunkte von Straßen und Gassen
- Punkt einer evtl. Richtungsänderung, also Beginn eines neuen Straßen- oder Gassensegments
- Länge der Straßen und Gassen bzw. der Straßen- und Gassenabschnitte

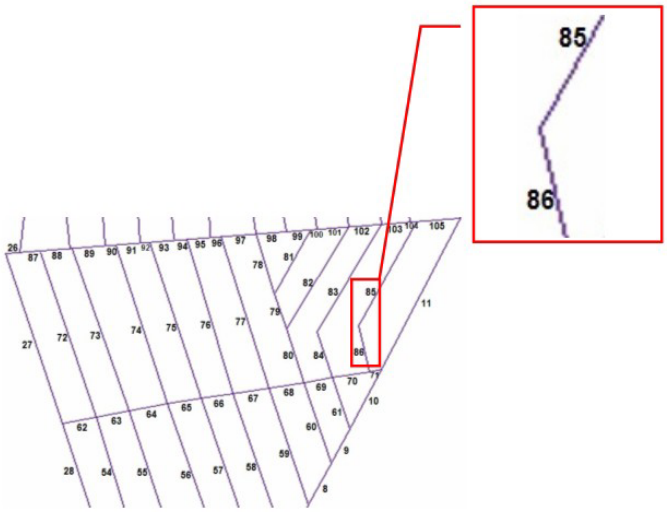


Abbildung 4: Segmentierung aufgrund einer Richtungsänderung im Rückegassenverlauf

Generell lässt sich sagen, dass Forststraßen und Rückegassen nur selten alleine durch einen Start- und Endpunkt definiert werden können. Verändert eine Straße oder Gasse ihren Richtungsverlauf, muss sie in mehrere Segmente unterteilt werden (s. Abbildung 4).
Diese relativ einfache Definition gilt allerdings auch nur für zweidimensional dargestellte Wegesysteme. Im noch nicht in die Modelle integrierten 3D-Bereich müssen andere Lösungsvarianten angewendet werden.

Bei der Modellentwicklung wird mit **Gauß-Krüger-Koordinaten**[10] gearbeitet, die in einem GIS abgebildet werden können. Durch Umrechnung dieser Koordinaten auf ein lokales Koordinatensystem in AutoMod wird zu einem späteren Zeitpunkt das entsprechende Erschließungssystem des Testbestandes 1:1 in die Simulationssoftware überführt.

Es existieren drei Wege, um die gesuchten Koordinaten der Forststraßen zu gewinnen:

1) Der erste Weg, der im Rahmen dieser Arbeit aus Gründen der hohen Qualität der Ergebnisse gewählt wird, ist die **terrestrische Einmessung** der Forststraßen. Am Lehrstuhl für Forstliche Arbeitswissenschaft entschied man sich bei der Suche nach einem Hilfsmittel zum Einmessen der Wegenetzkoordinaten für einen **Theodoliten**[11]. Dieses Gerät, das ansonsten vor allem in der Landvermessung (Geodäsie) seine Anwendung findet, erwies sich für die Positionsbestimmung der Wegenetzpunkte als gut nutzbar. Die Handhabung ist innerhalb eines Tages einzuüben, und die Ergebnisse der Messungen besitzen die gewünschte Genauigkeit.

2) Die sicherlich elegantere sowie Zeit und Kosten sparende Methode bezieht sich auf die Auswertung von bereits vorhandenem, **digitalem Kartenmaterial** bzw. auf die Auswertung von **Luftaufnahmen** in einem GIS.
   Digitales Kartenmaterial zu den Forststraßen ist für den nordrhein-westfälischen Testbestand bereits vorhanden. Die Firma **LOGIBALL** erweiterte das bereits in digitaler Form existierende, öffentliche Straßennetz um zusätzliche Wirtschaftswege. Diese Daten wurden in Zusammenarbeit mit der Landesforstverwaltung NRW auf die Befahrbarkeit mit LKW geprüft und anschließend gemäß des **GeoDat-Standard** in den Navigationsdatenbestand integriert (VON UNRUH, 2006). Sie sind bei der Modellierung problemlos nutzbar.

3) Eine Auswertung speziell durchgeführter Luftaufnahmen wird zurzeit durch das Institut für Mensch-Maschine-Interaktion der RWTH Aachen im Bereich der Bestandesanalyse durchgeführt (ROSSMANN, 2005). Es ist zu erwarten, dass auch die Qualität dieser Daten eine Weiterverwendung im Modell erlauben wird.

[10] Das Gauß-Krüger-Koordinatensystem ist ein Koordinatensystem, das es ermöglicht, jeden Punkt der Erde mit einer Koordinate (Rechts- und Hochwert) eindeutig zu verorten (SCHÖDLBAUER, DRAHEIM, 1982).

[11] Geodätisches Instrument zum Messen von Horizontal- und Vertikalwinkeln. Hauptbestandteile sind Horizontal- und Vertikalkreis mit Ablesevorrichtungen, ein um eine horizontale Achse (Kippachse) drehbares Zielfernrohr sowie Vorrichtungen zum Senkrechtstellen der Umdrehungsachse. Der Theodolit ist auf einem dreibeinigen Stativ montiert. Theodolite mit Einrichtungen zur Entfernungsmessung werden als **Tachymeter** (Schnellmesser) bezeichnet. Elektronische Tachymeter arbeiten mit einem modulierten Infrarotsender und einem Reflektor am Zielpunkt. Die Entfernung wird durch Phasenvergleich zwischen reflektiertem und Referenzsignal bestimmt (BROCKHAUS, 2003).

Informationen über das Rückegassensystem sind deutlich schwieriger zu ermitteln:

Auswertungen von Luftaufnahmen sind wegen Überschirmungen der Rückegassen durch Baumkronen zum Teil nur schwer möglich. Nimmt man aber eine bestmögliche Datenqualität der Positionsangaben als Voraussetzung an, bleibt nur die **terrestrische Einmessung des Gassensystems** vor Ort als Möglichkeit zur Datengewinnung.

Als Alternative zu diesem recht zeit- und kostenaufwendigen Vorgehen besteht die Möglichkeit, ein **idealisiertes Gassensystem** in das Modell zu integrieren. Dabei können Informationen aus Begehungen oder Handskizzen der Revierleiter mit einfließen. Vorab kann aber auch ein fester Rückegassenabstand definiert werden, der zu einer streng schematischen Aufteilung der Fläche führt. Ausgehend von der tatsächlichen Bestandesfläche wird das neue Gassennetz in einem GIS gezeichnet. Anschließend können die Koordinaten der einzelnen Segmente abgelesen und nach Umrechnung auf das lokale Koordinatensystem und Transformation auf das softwareinterne Koordinatensystem schließlich in das Modell integriert werden (s. Abbildung 5).

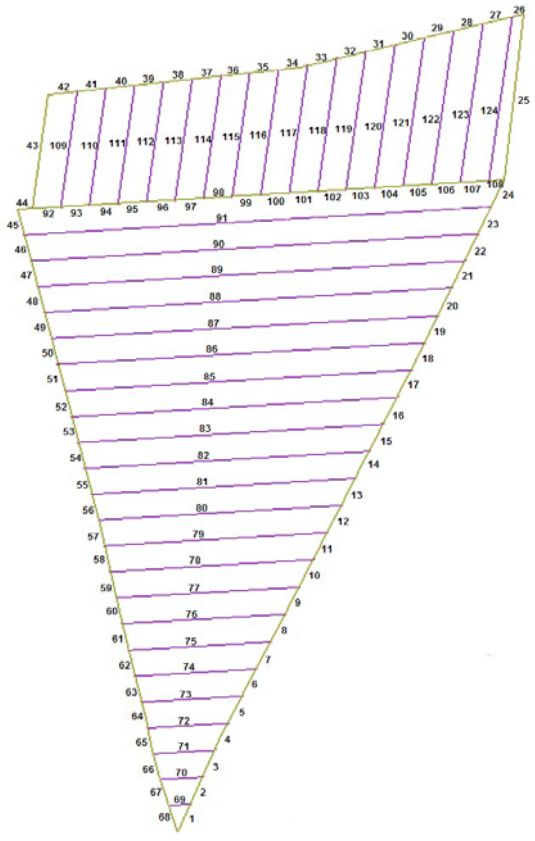


Abbildung 5: Schematische Einteilung des Rückegassennetzes mit einem regelmäßigen Abstand von 20 m

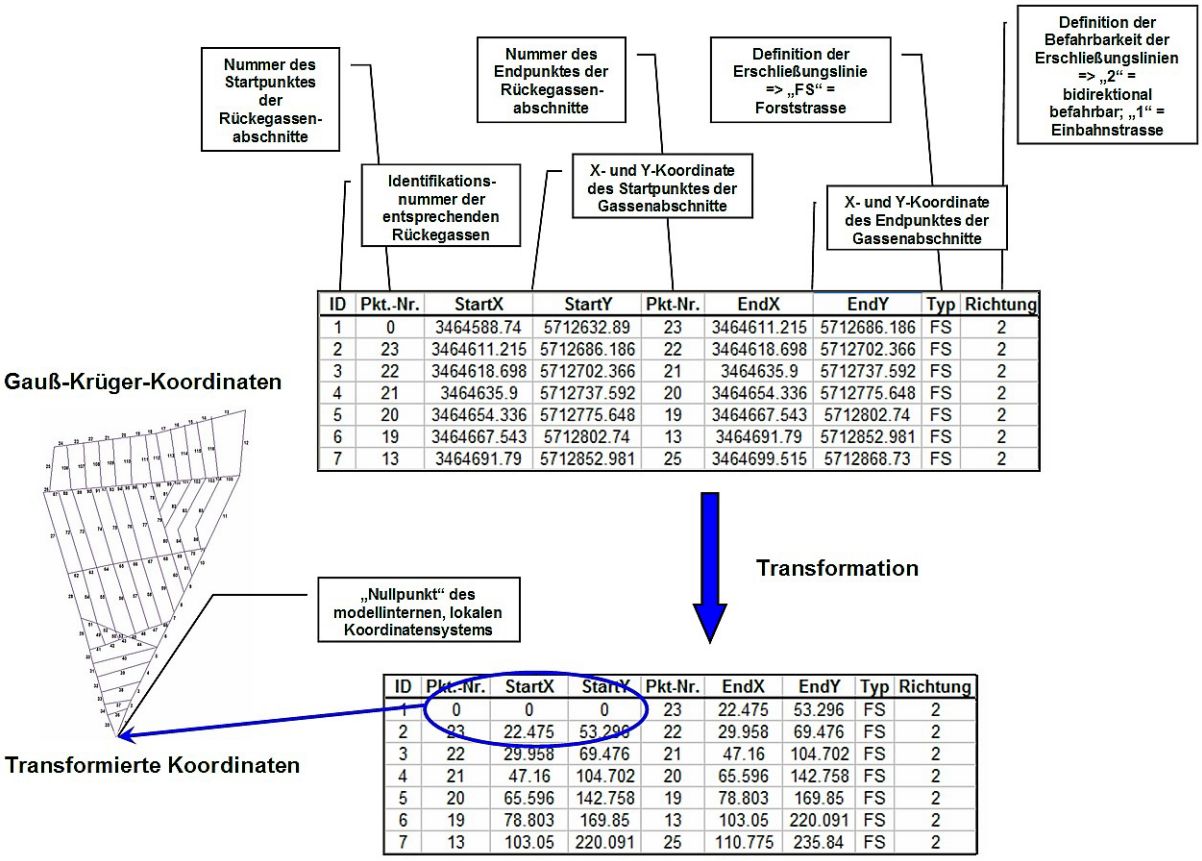
Für die Polterplätze lassen sich die Koordinaten nach Absprache mit dem Revierleiter problemlos in einem GIS ablesen und in das Modell übertragen.

4.2.3 Implementierung der Wegenetzdaten in das Modell

Nachdem die Koordinaten der Bestandesfläche, der Forststraßen, Rückegassen und der Polterplätze ermittelt und die Erschließungslinien definiert wurden, kann mit der Implementierung der Daten begonnen werden. Dabei werden folgende Arbeitsschritte ausgeführt:

1. Umrechung aller Koordinaten auf ein kartesisches[12], modellinternes Koordinatensystem

   Durch eine Transformation auf der Basis eines zuvor im Modell festgelegten Nullpunktes, werden alle benötigten Koordinaten errechnet. Ein Beispiel zeigt Abbildung 6.



ID	Pkt.-Nr.	StartX	StartY	Pkt-Nr.	EndX	EndY	Typ	Richtung
1	0	3464588.74	5712632.89	23	3464611.215	5712686.186	FS	2
2	23	3464611.215	5712686.186	22	3464618.698	5712702.366	FS	2
3	22	3464618.698	5712702.366	21	3464635.9	5712737.592	FS	2
4	21	3464635.9	5712737.592	20	3464654.336	5712775.648	FS	2
5	20	3464654.336	5712775.648	19	3464667.543	5712802.74	FS	2
6	19	3464667.543	5712802.74	13	3464691.79	5712852.981	FS	2
7	13	3464691.79	5712852.981	25	3464699.515	5712868.73	FS	2

ID	Pkt.-Nr.	StartX	StartY	Pkt-Nr.	EndX	EndY	Typ	Richtung
1	0	0	0	23	22.475	53.296	FS	2
2	23	22.475	53.296	22	29.958	69.476	FS	2
3	22	29.958	69.476	21	47.16	104.702	FS	2
4	21	47.16	104.702	20	65.596	142.758	FS	2
5	20	65.596	142.758	19	78.803	169.85	FS	2
6	19	78.803	169.85	13	103.05	220.091	FS	2
7	13	103.05	220.091	25	110.775	235.84	FS	2

Abbildung 6: Transformation von Gauß-Krüger-Koordinaten in lokale Koordinaten

Hier wird der Startpunkt von Erschließungslinie 1 (in diesem Fall eine Forststraße) gleich Null gesetzt. Durch Subtraktion der X- und Y-Werte für den Startpunkt der Erschließungslinie 1 von den X- und Y-Werten der Start- und Endpunkte aller Erschließungslinien (noch im Gauss-

[12] Ein kartesisches Koordinatensystem ist ein orthogonales Koordinatensystem, dessen Koordinatenlinien Geraden in konstantem Abstand sind. Es handelt sich um das am häufigsten verwendete Koordinatensystem, da sich viele geometrische Sachverhalte in diesem am besten beschreiben lassen. Die horizontale Achse wird als Abszisse, x-Achse oder Rechtsachse bezeichnet. Die vertikale Achse heißt entsprechend Ordinate, y-Achse oder Hochachse.

Krüger-Format) werden die weiteren Koordinaten für das softwareinterne Koordinatensystem berechnet.

Des Weiteren ist es notwendig, zusätzliche Definitionen für jeden Wegenetzabschnitt festzulegen. Dazu gehören neben der bereits erläuterten Einteilung in „Forststraße“ (FS) und „Rückegasse“ (RG) auch **Richtungsangaben für die Befahrbarkeit**. Unter Richtungsangabe versteht man eine Aussage darüber, ob das entsprechende Wegesegment nur in eine oder auch in zwei Richtungen befahrbar ist. Diese Information ist bei der (hier noch nicht durchgeführten) Integration von digitalen Geländemodellen wichtig, da ab einer bestimmten Steigung bzw. ab einem bestimmten Gefälle je nach Maschinentyp nur noch in eine Richtung gefahren werden kann. In diesem Fall würde der Nutzer anstatt einer „2“ für bidirektionales Fahren eine „1“ als Richtungsparameter festlegen. Das bedeutet, eine Maschine könnte während der Simulation auf diesem Streckenabschnitt nur in eine Richtung fahren. Der Richtungsverlauf wird durch die Reihenfolge der Koordinatenangabe in der entsprechenden Tabelle festgelegt. Somit wäre der entsprechende Abschnitt nur vom Quellpunkt (= Startkoordinaten des Abschnittes) in Richtung Zielpunkt (= Endkoordinaten des Abschnitts) befahrbar.

Ebenso führt die Einbeziehung dreidimensionaler Verhältnisse dazu, dass sich bei Gefälle und Steigungen die Fahrgeschwindigkeiten der Maschinen verändern. Ein Harvester fährt beispielsweise bei einer 10 %igen Steigung mit geringerer Geschwindigkeit als in ebenem Gelände. Daher ist in einem zukünftigen Modell mit dreidimensionalen Strukturen der Einbau einer Funktion notwendig, die es erlaubt, die vorab definierte Fahrgeschwindigkeit entsprechend zu erhöhen (bergab) bzw. abzusenken (bergauf). Erreicht die Maschine während der Simulation eine mit einem solchen Faktor versehene Straße oder Gasse, wird ihre Fahrgeschwindigkeit automatisch angepasst (mit Ausnahme des Faktors „1“).

2. Transformation der neu gewonnen Koordinaten in den Quellcode der Software

In einem nächsten Schritt überträgt man die neu gewonnenen Koordinaten in den Quellcode der Software AutoMod (s. Abbildung 7). Dieser Vorgang wurde mit Hilfe des Tabellenkalkulationsprogramms „MS Excel“ automatisiert.

Sourcecode
GPATH name hauptweg1 two piece begx 0 begy 0 endx 22.4749999996274 endy 53.2960000000894 upz 1
GPATH name hauptweg2 two piece begx 22.4749999996274 begy 53.2960000000894 endx 29.9579999996349 endy 69.4760000007227 upz 1
GPATH name hauptweg3 two piece begx 29.9579999996349 begy 69.4760000007227 endx 47.1599999996833 endy 104.702000000514 upz 1
GPATH name hauptweg4 two piece begx 47.1599999996833 begy 104.702000000514 endx 65.5959999999031 endy 142.758000000379 upz 1
GPATH name hauptweg5 two piece begx 65.5959999999031 begy 142.758000000379 endx 78.8029999998398 endy 169.850000000558 upz 1
GPATH name hauptweg6 two piece begx 78.8029999998398 begy 169.850000000558 endx 103.049999999813 endy 220.091000000014 upz 1
GPATH name hauptweg7 two piece begx 103.049999999813 begy 220.091000000014 endx 110.774999999906 endy 235.840000000782 upz 1

Abbildung 7: Auszug aus dem Quellcode für das Erschließungssystem der Software AutoMod in MS Excel

3. Darstellung des Erschließungssystems im Modell

Nach der Übernahme des entsprechenden Quellcodes in die Software ist das Erschließungssystem inklusive der Polterplätze als „Grundlage“ des gewünschten Waldabschnittes fertig gestellt. Das fertige Wegenetzwerk zeigt Abbildung 8.

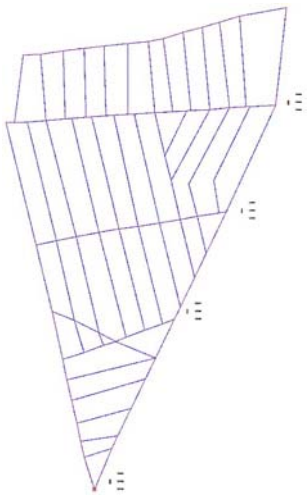


Abbildung 8: Fertig gestelltes Erschließungssystem des Testbestandes im AutoMod-Modell

Wie bereits erwähnt, wird das neu entwickelte Modell vorerst nur ebenes Gelände abbilden, da die Anpassung von Forststraßen und Rückegassen an unebenes Gelände aus Zeit- und Kostengründen nicht umgesetzt werden kann. Dreidimensionale Verhältnisse werden daher nicht simuliert. Somit können auch die technische Umsetzung hinsichtlich der Bestandesmodellierung und die genauen Auswirkungen auf die Arbeitssysteme in dieser Arbeit noch nicht erprobt werden. Dies wird Aufgabe weiterer Entwicklungsarbeiten sein.

4.3 Gewinnung und Aufbereitung der Daten des aufstockenden und ausscheidenden Bestandes

Bestandesfläche und Erschließungsnetz sind fertig gestellt, die „Basis“ für das Modell ist geschaffen. Nun wird die Gewinnung von Bauminformationen für den Testbestand näher betrachtet. Dazu werden folgende Informationen benötigt:

- Informationen über die **Baumartenanteile und den Bestockungsgrad**[13] auf der Bestandesfläche
- Informationen über das **Alter** der Bäume
- Einzelbaumweise oder auf Mittelwerten basierende Informationen zu den Parametern **„BHD“ (Brusthöhendurchmesser**[14]**) und „Höhe“**
- Informationen über die **Position der Bäume** im Bestand
- Informationen über die geplante, waldbauliche **Eingriffsart** und davon ausgehend **einzelbaumweise Informationen über den ausscheidenden Bestand**
- Informationen über die **Aushaltung**[15] der geernteten Bäume
- Einzelbaumweise Informationen über **Qualität, Durchmesser, Länge und Volumen der Stämme und/oder Stammabschnitte**, die durch die Aufarbeitung entstehen

4.3.1 Das Forsteinrichtungswerk als Informationsquelle

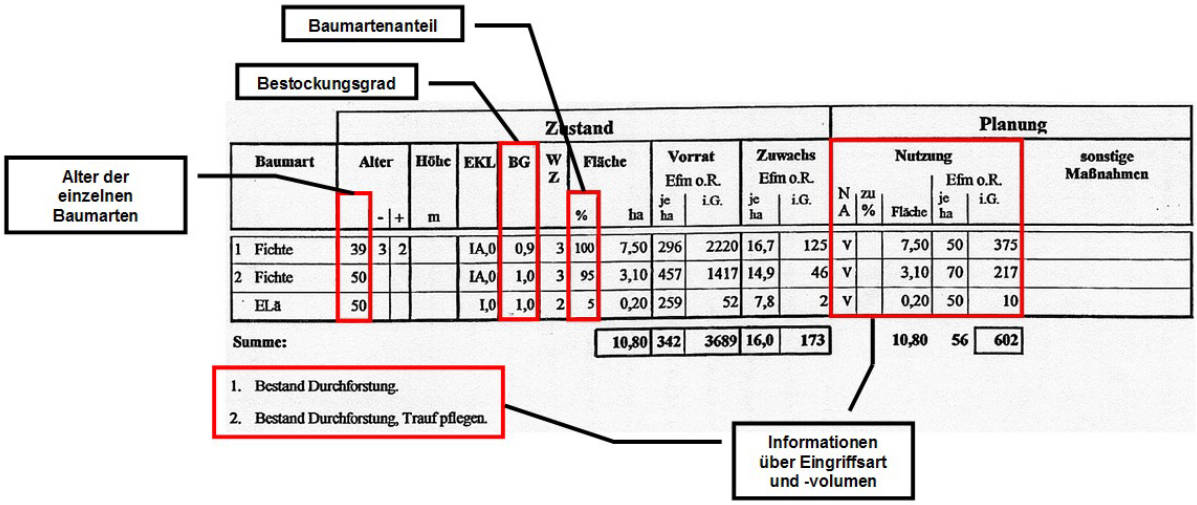
Als Informationsquelle für die gesuchten Parameter „Baumartenanteile“, „Bestockungsgrad“, „Alter der einzelnen Baumarten“ sowie „Eingriffsart“ dient das Forsteinrichtungswerk[16] (s. Abbildung 9), welches an den jeweiligen Forstämtern aufbewahrt und in geregelten Abständen aktualisiert wird. Ebenso sind Daten über die Höhe und den Durchmesser des Grundflächenmittelstammes enthalten (KENNEL, 2001).
Die Qualität und die Aushaltungskriterien der geernteten Bäume sollten kurzfristig mit dem zuständigen Forstamt bzw. Revierleiter abgestimmt werden. Diese Parameter können in Anbetracht der stetigen Veränderungen im Wald, aber auch auf dem Holzmarkt nur kurz vor der Ernte präzise formuliert werden.

[13] Das Verhältnis von tatsächlicher Bestandesgrundfläche (oder Vorrat) je ha zu den entsprechenden Werten der Ertragstafel (z.B. 0,9 oder 1,1) (KRAMER, AKÇA, 1995).

[14] In der praktischen Forstwirtschaft wird der Durchmesser eines stehenden Stammes in 1,3 m Höhe gemessen und als Brusthöhendurchmesser (BHD) bezeichnet (KRAMER, AKÇA, 1995).

[15] Die Aufbereitung (Zerlegung) der gefällten Bäume in einzelne, dem Verwendungszweck entsprechende Teile.

[16] Umfassende Ergebnisdokumentation (Schriften und Karten) hinsichtlich Zustandserfassung und Planung der Forsteinrichtung eines Forstbetriebes (KENNEL, 2001).



Baumart	Zustand: Alter	Alter -	Alter +	Höhe m	EKL	BG	W Z	Fläche %	Fläche ha	Vorrat Efm o.R. je ha	Vorrat Efm o.R. i.G.	Zuwachs Efm o.R. je ha	Zuwachs Efm o.R. i.G.	Planung: Nutzung NA	Nutzung zu %	Nutzung Fläche	Nutzung Efm o.R. je ha	Nutzung Efm o.R. i.G.	sonstige Maßnahmen
1 Fichte	39	3	2		IA,0	0,9	3	100	7,50	296	2220	16,7	125	V		7,50	50	375	
2 Fichte	50				IA,0	1,0	3	95	3,10	457	1417	14,9	46	V		3,10	70	217	
ELä	50				I,0	1,0	2	5	0,20	259	52	7,8	2	V		0,20	50	10	
Summe:									10,80	342	3689	16,0	173			10,80	56	602	

1. Bestand Durchforstung.
2. Bestand Durchforstung, Trauf pflegen.

Abbildung 9: Auszug aus einem Forsteinrichtungswerk des zu simulierenden Testbestandes

4.3.2 Modellierung des aufstockenden und ausscheidenden Bestandes

Um genaue Einzelbauminformationen über die Position der Bäume sowie Qualität, Durchmesser, Länge und Volumen der Stämme und/oder Stammabschnitte zu erhalten, ist ein komplizierter Prozess zu durchlaufen, der nun näher beschrieben wird (s. Abbildung 10).

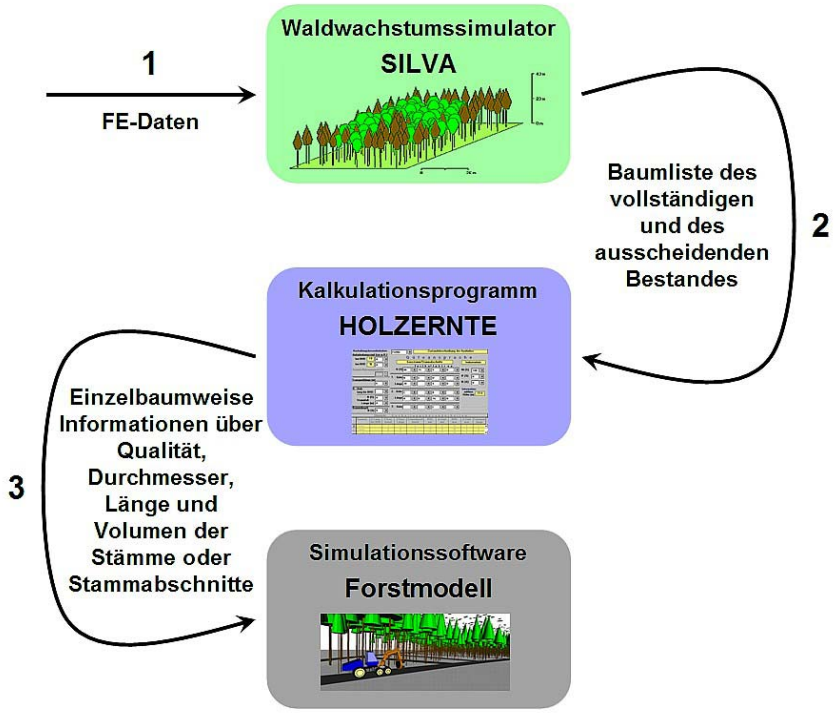


Abbildung 10: Weg zur Herleitung und Integration der Bestandes- und Sortimentsdaten mit Hilfe der Programme SILVA und HOLZERNTE

4.3.2.1 Der Waldwachstumssimulator SILVA

Erste Aufgabe ist die Generierung des Gesamtbestandes mit Hilfe des Waldwachstumssimulators SILVA des Lehrstuhls für Waldwachstumskunde der TU München. SILVA ist in der Lage, auf der Basis von **Höhe und Durchmesser des Grundflächenmittelstammes** sowie **Alter, Baumart, Stammzahl und Grundfläche pro Hektar** einen Bestand zu generieren, der in etwa dem real existierenden Bestand entspricht (PRETZSCH, BIBER, DURSKY 2002). Als Eingangsdaten dienen die Werte des Forsteinrichtungswerkes. Abbildung 11 zeigt die entsprechende Benutzeroberfläche von SILVA, in der man die Grundeinstellungen zur Bestandesgenerierung vornehmen kann.

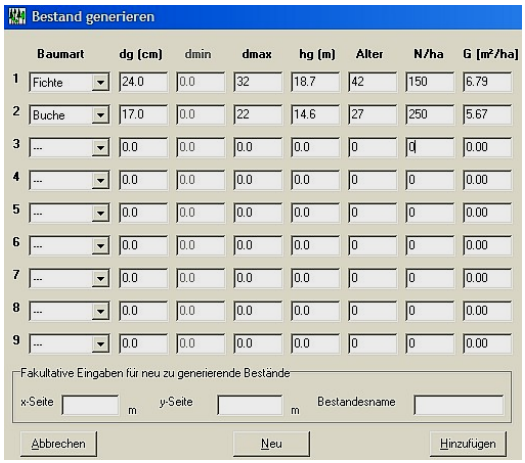


Abbildung 11: Benutzeroberfläche zur Eingabe der Kennzahlen bei der Bestandesgenerierung in SILVA (SILVA, 2006)

Sind alle Einstellungen getätigt, beginnt SILVA mit der Simulation. Es erzeugt Bestandesstrukturen, d. h. eine Baumzahldurchmesserverteilung, Baumhöhen und Baumpositionen, wenn diese nicht bereits vor Ort eingemessen und in SILVA übertragen worden sind. Auch Art, Häufigkeit und Stärke der anthropogenen Eingriffe müssen spezifiziert sein. Dann startet die Prognose, die sich über eine festgelegte Zahl von Simulationsperioden erstreckt, z. B. 20 Perioden mit jeweils 5 Jahren pro Periode. Am Ende des Prognosezeitraumes liegen **für jeden Baum** alle forstwirtschaftlich relevanten Daten vor, etwa zur Durchmesser- und Höhenentwicklung. Neben diesen vielfältigen numerischen Informationen wird dem Benutzer für jeden Simulationszeitpunkt eine einfache graphische Darstellung des simulierten Waldbestandes zur Verfügung gestellt (s. Abbildung 12).

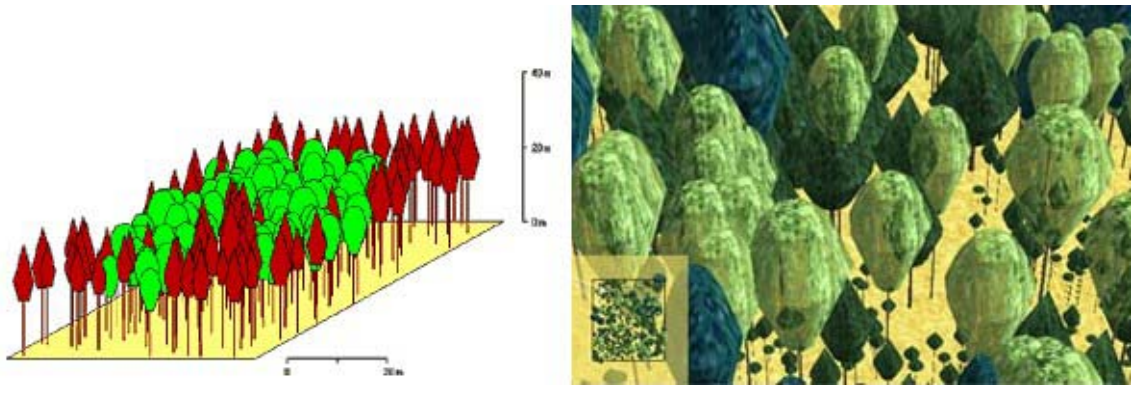


Abbildung 12: Graphische Darstellung der simulierten Bestände in SILVA und TreeView (Quelle: http://www.wwk.forst.tu-muenchen.de/info/vis/3D_html)

Da es sich bei Bäumen um dreidimensionale Objekte handelt, wurde eine dreidimensionale Darstellungsmöglichkeit über das Programm **TreeView** geschaffen (s. Abbildung 12). Aus den vorhandenen Daten werden für jeden einzelnen Baum dreidimensionale Körper erzeugt. Diese werden entsprechend der Baumkoordinaten auf einen Boden gestellt und mit Hilfe der Zentralprojektion auf dem Bildschirm abgebildet. Durch verschiedenste Optimierungen ist es dem Benutzer möglich, sich in Echtzeit durch einen solchen virtuellen Wald zu bewegen und ihn dabei aus jeder beliebigen Position zu betrachten. Durch die Interaktionsmöglichkeiten im virtuellen Bestand ist diese Darstellungsvariante vielseitig einsetzbar: Vom einfachen Darstellen eines Bestandes bis hin zum Training von Holzerntemaßnahmen.
Als Ergänzung zu dieser Bestandesvisualisierung wurde ein weiteres Programm namens **L-Vis** entwickelt, mit dem man ganze Waldlandschaften darstellen kann. Daten aus Forstbetrieben, beispielsweise über die Waldverteilung oder Struktur, wie sie in Inventuren anfallen, können so durch Stratenbildung oder Interpolation auf der Basis von Inventurpunkten mit Hilfe von SILVA und L-Vis wieder in Darstellungen der Waldflächen umgewandelt werden. Veränderungen im Aussehen dieser Waldlandschaften lassen sich so ohne tatsächlichen Eingriff schon im Voraus beurteilen und auch Waldentwicklungen darstellen (Quelle: http://www.wwk.forst.tu-muenchen.de/info/vis/3D_html).

SILVA erzeugt am Ende der Simulation eine ASCII-Datei mit einzelbaumweisen Informationen über Baumart, BHD, Höhe und Position (X- und Y-Koordinate). Diese Daten werden im Anschluss in eine MS Access-Datenbank überführt. An dieser Stelle sind nun für jeden einzelnen Baum sämtliche benötigte Informationen vorhanden. Dabei ist zu beachten, dass die Positionsangaben zu den Bäumen rein zufällig durch SILVA ausgewählt werden und somit nicht den tatsächlichen Positionen im Bestand entsprechen. Da aber aus zeitlichen und kostentechnischen Gründen bis heute (noch) nicht jeder einzelne, real existierende Baum des Testbestandes mit seiner individuellen Position eingemessen werden konnte, stellt diese Vorgehensweise die bestmögliche Alternative dar.
Als weiteres Problem kommt hinzu, dass SILVA nur Bestände für eine **begrenzte Fläche bzw. nur eine bestimmte Anzahl von Bäumen** abbildet. Da der zu modellierende Bestand mit knapp 11 ha aber eine relativ große Fläche mit zahlreichen Bäumen besitzt, muss der ursprüngliche SILVA-Bestand „geklont“, auf der Basis von Inventurpunkten durch Interpolation oder durch Stratenbildung erweitert werden.

Bei der Arbeit mit AutoMod entschied man sich, die gewählte Bestandesfläche durch **„Klonung“** des Ausgangsbestandes mit Bäumen „aufzufüllen“. Dies geschieht durch die Verteilung so genannter „Quadranten[17]“ über die reale Bestandesfläche mit Hilfe einer entsprechenden Vervielfältigung der Baumliste in MS Access. Die Quadranten werden dabei durch die Erstellung **spezieller Abfragen in MS Access** (s. unten) gebildet.

[17] Als „Quadrant“ wird ein geklonter Bestand, der aus dem Originalbestand in SILVA hervorgegangen ist, bezeichnet.

4.3.2.2 Zusammenführung der Daten unterschiedlicher Bestände

Im Testmodell werden im Bestand zwei verschiedene Abteilungsflächen (Abteilung „A1“ und „A2“) dargestellt. Für jede Abteilung wird in SILVA auf Basis der Forsteinrichtungsdaten ein Bestand simuliert, d.h. für beide Abteilungsflächen liegen unterschiedliche Bestandesdaten in Form von zwei Quadranten vor. Zuerst werden die Quadranten über die jeweilige Abteilungsfläche verteilt (s. Abbildung 13).

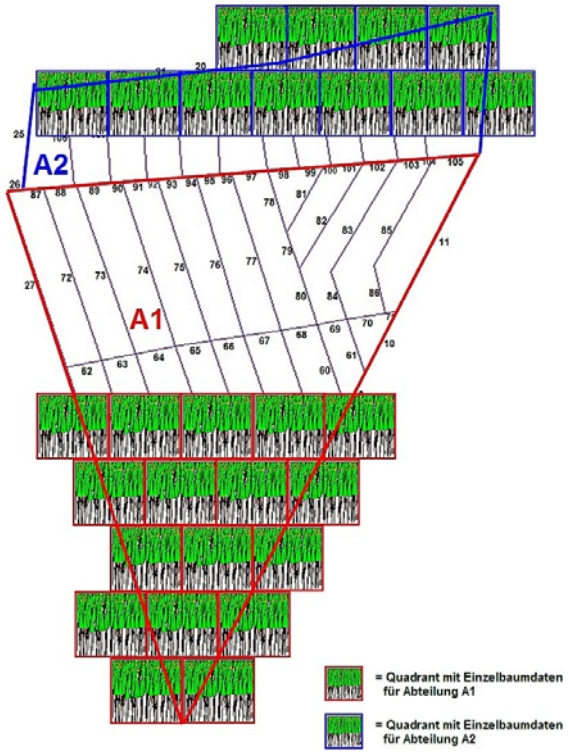


Abbildung 13: Verteilung der Quadranten über die Abteilungsflächen

Die „Klonung“ eines Quadranten sieht vor, dass ein bereits auf der Fläche positionierter Quadrant mit Hilfe einer MS Access-Abfrage inklusive aller dazugehörigen Daten „verdoppelt“ wird. Allerdings muss der neu erzeugte Quadrant dabei „verschoben“ werden, da er sonst exakt auf dem schon vorhandenen Quadranten platziert werden würde. Für eine vertikale Verschiebung der einzelnen Bäume müssen alle Y-Koordinaten verändert werden. Möchte man den Quadranten horizontal bewegen, sind dementsprechend die X-Koordinaten zu manipulieren. Der Wert, um den die Koordinaten wahlweise erhöht oder verringert werden, ergibt sich aus der Kantenlänge des in SILVA erzeugten Bestandes. Da SILVA vorzugsweise nur eine Flächengröße von einem Hektar simuliert, bewegt sich dieser Wert meist im Bereich von 0 bis 100 Metern. Der in Abbildung 14 dargestellte Quadrant besitzt beispielsweise eine Kantenlänge von 77 Metern.

Die Verteilung der Quadranten wird bei der Modellerstellung manuell durchgeführt. Dies bedeutet, dass das Ergebnis jeder einzelnen Abfrage immer wieder graphisch überprüft werden kann, um sicherzustellen, dass keine Lücken bei der „Bestockung“ der Flächen zurückbleiben. Diese Arbeitsweise ist aufwendig, könnte aber in einem zukünftigen Modell durch Programmierung eines „Verteilungs-Algorithmus“ vereinfacht werden.

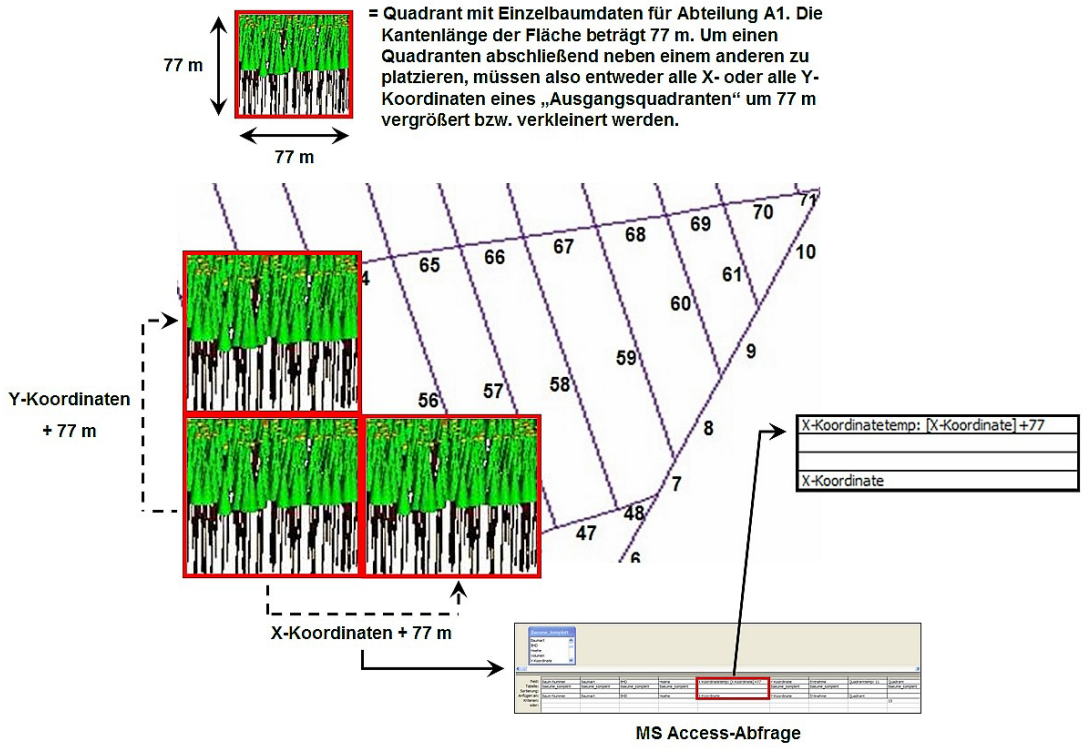


Abbildung 14: "Klonung" der Quadranten mit Hilfe spezieller Abfragen in MS Access

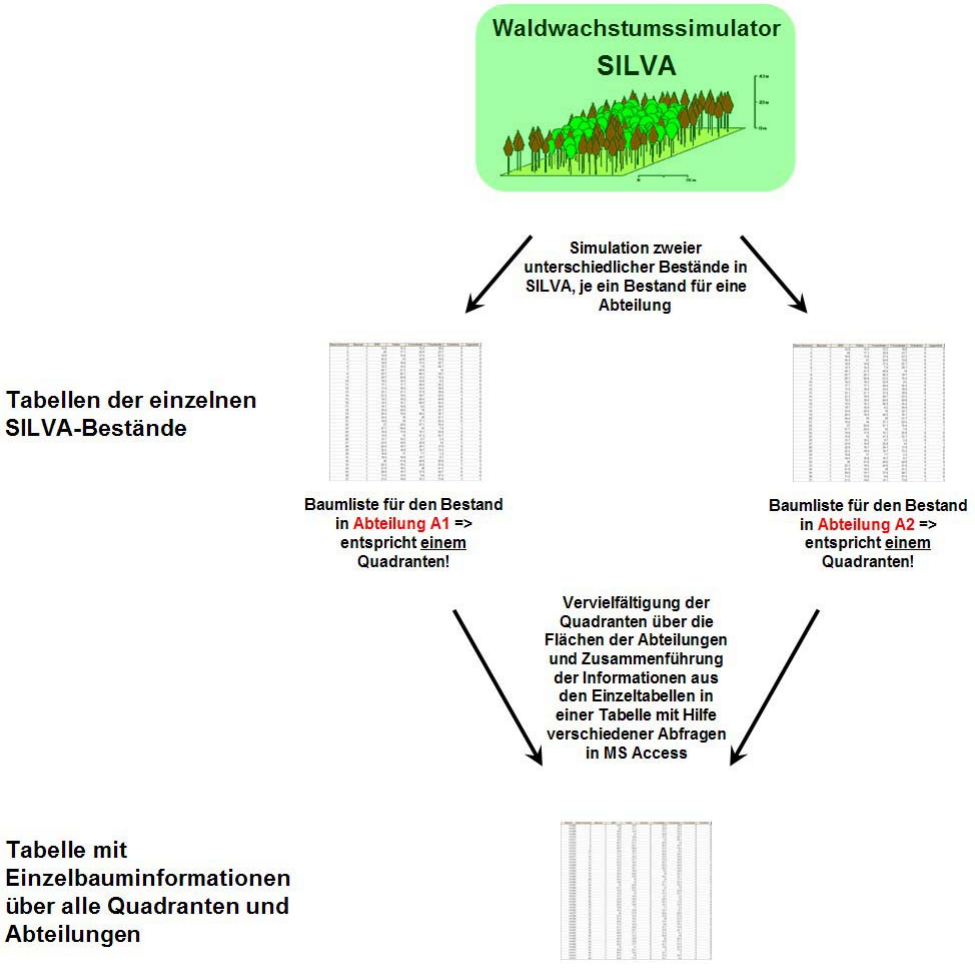


Abbildung 15: Zusammenführung der Daten einzelner Bestände in einer Tabelle

Sämtliche Bauminformationen, also Daten über alle Bäume aller Quadranten aller Abteilungen werden somit im Zuge der Abfragen in einer großen Tabelle zusammengeführt (s. Abbildung 15).
Graphisch ergibt sich nun aber das Problem, dass der viereckige Ausgangsbestand an die Fläche des Originalbestandes angepasst werden muss, da an bestimmten Stellen Bäume über die Bestandesgrenze hinweg stehen. Durch entsprechendes „Zuschneiden“ der duplizierten SILVA-Bestände kann aber auch dieses Problem gelöst werden (s. Abbildung 16).

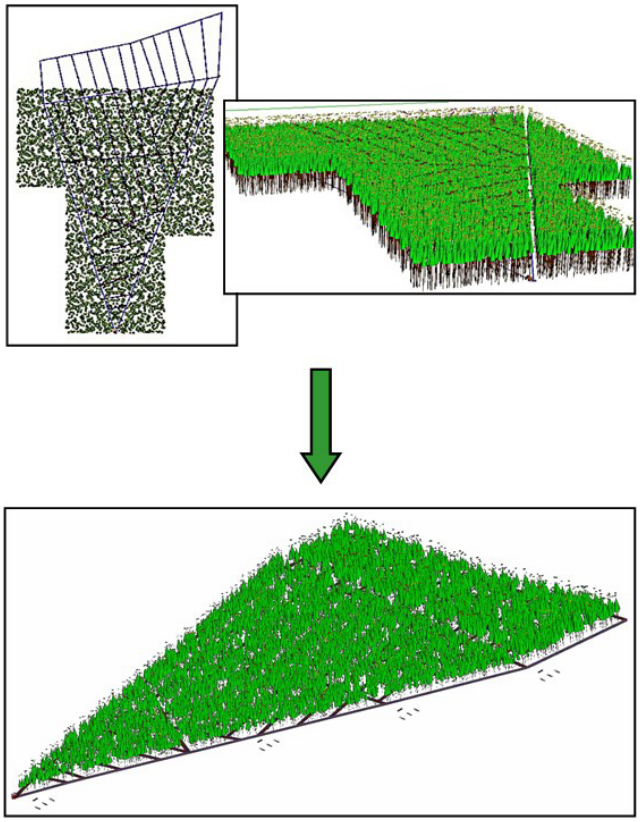


Abbildung 16: Testbestand mit "geklonten" SILVA-Beständen (oben) und nach Entfernung der „überstehenden“ Bäume (unten)

Dabei wird das Modell so programmiert, dass alle Bäume, die sich außerhalb der tatsächlichen Bestandesfläche befinden, automatisch verschwinden. Da es sich bei diesem Bestand nicht um eine Ersterschließung handelt, müssen auch sämtliche Bäume, die sich nach der Quadrantenbildung auf Forststraßen und Rückegassen befinden, automatisch vor Beginn der Simulation entfernt werden. Diese Funktion wird in das Modell des Testbestandes integriert, ist aber für die Darstellung von Ersterschließungen recht einfach zu- oder abschaltbar.

Nachdem der Gesamtbestand komplett modelliert ist, müssen die zu erntenden Bäume bestimmt werden. In SILVA erhält man bei der Bestandesgenerierung mit der Baumliste des Gesamtbestandes durch Simulation eines Holzernteeingriffs auch gleichzeitig die Information, welche dieser Bäume dem ausscheidenden Bestand angehören. Sie sind in der Spalte „Entnahme“ mit einer „1“ gekennzeichnet (s. Abbildung 17).

Baum-Nummer	Baumart	BHD [cm]	Höhe [m]	X-Koordinate	Y-Koordinate	Entnahme?
1	10	23.6	19	57.7	78.4	0
2	10	26.4	19.6	13.2	57.2	0
3	10	12.9	15	58.8	59.5	0
4	10	12.4	13.7	2.9	65.4	0
5	10	34.5	20.1	77	25.3	0
6	10	30.3	20.5	55.1	3.1	0
7	10	16.1	16.3	40.5	60.5	0
8	10	28.7	19.1	36.5	17.1	0
9	10	29.7	20.3	31.3	79.4	0
10	10	22.2	17.6	62.4	12	0
11	10	20	17.5	5.5	16.8	0
12	10	26.2	17.9	38.4	55.1	0
13	10	21.2	18.2	37.8	63.8	0
14	10	12.8	15.2	17	21.8	0
15	10	21.1	18	37.9	17.8	0
16	10	25.7	19.2	58.3	58.1	1
17	10	36	20.8	79.5	58.5	0
18	10	28.5	19.2	12.6	62.8	0
19	10	27.5	19.6	79.2	46.8	0
20	10	25.6	18.3	35.4	76.6	0
21	10	34	20.9	15	46	0
22	10	23.2	19.3	79.3	8.5	0
23	10	28	19.7	60.2	51.4	0
24	10	24.9	18.5	4.3	23.2	0
25	10	13.4	14.1	53.3	12.2	0
26	10	20.2	18.2	11.1	62.1	0
27	10	23.8	18.2	44.4	75.4	0
28	10	21.3	18.2	74.1	81.5	0
29	10	24.4	19	81	36.7	1

Abbildung 17: Auszug aus der SILVA-Tabelle des Gesamtbestandes inkl. ausscheidendem Bestand

In der angelegten Baumdatenbank müssen diese Bäume ebenfalls als „zu entnehmen“ markiert werden. Zusätzlich kann bei der graphischen Darstellung oberhalb des Baumes eine spezielle Markierung angebracht werden, die den Baum als Erntebaum kennzeichnet (s. Abbildung 18).

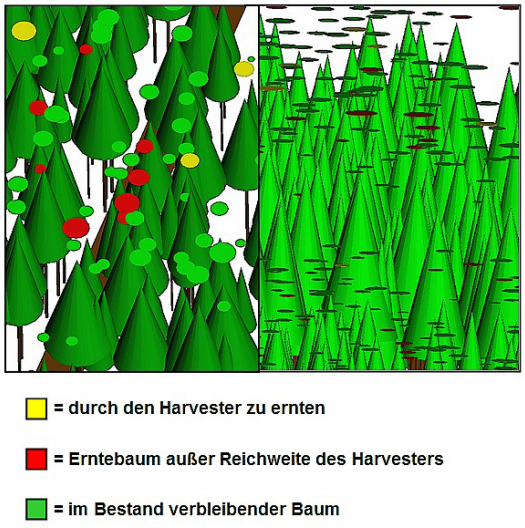
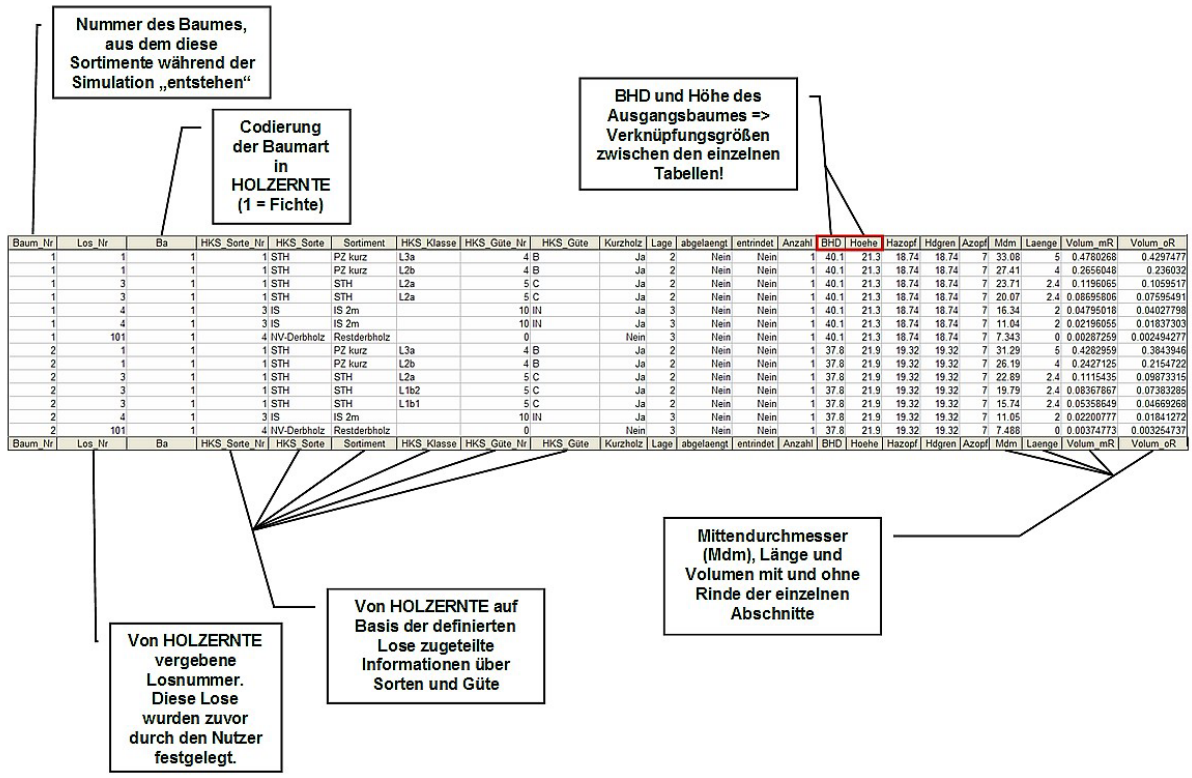


Abbildung 18: Unterschiedliche Markierungen der Bäume in der graphischen Darstellung

4.3.2.3 Das Programm HOLZERNTE

Man besitzt nun also eine Liste des gesamten Bestandes inkl. Definition der zu erntenden Bäume. Diese Liste enthält zwar einzelbaumweise Informationen über Baumart, BHD, Höhe und Position, allerdings fehlen Aussagen über Volumen, Anzahl, Art und Güte der Stämme und Stammabschnitte, die aus jedem Baum bei der Ernte gewonnen werden. Um diese, für eine realitätsnahe Simulation notwendigen Daten zu erhalten, wird die Kalkulationssoftware HOLZERNTE der FVA Baden-Württemberg hinzugezogen. HOLZERNTE liefert rechnergestützte Entscheidungshilfen für Holzernte

und Holzvermarktung. Im Holzerntebetrieb dient es der Vor- und Nachkalkulation von Hieben. Im Mittelpunkt steht dabei die Herleitung des erntekostenfreien Holzerlöses (HRADETZKY, SCHOPFER, 2001). Mit Hilfe der Software ist es möglich, am Ende eines Kalkulationslaufes sowohl die einzelbaumweisen Informationen über die Sortimente und deren Volumen, als auch über das gesamte Volumen der einzelnen Bäume zu erhalten (STÖHR, 2003). Theoretisch könnten aus der Liste des Gesamtbestandes diejenigen Bäume herausgefiltert werden, die für die Ernte vorgesehen sind und zur weiteren Auswertung in das Programm HOLZERNTE eingelesen werden. Allerdings würde man sich damit unnötig auf diese Bäume als Erntebäume festlegen, da nur für sie entsprechende Sortimente in HOLZERNTE berechnet würden. Erzeugt man aber Sortimente für alle Bäume des aufstockenden Bestandes, kann der Nutzer sogar manuell in der Datenbank Bäume zur Entnahme auswählen; eine Vorgehensweise, die zumindest in kleinflächigen Beständen denkbar wäre.
An dieser Stelle wird zum besseren Verständnis ein Überblick über die von HOLZERNTE berechneten Informationen gegeben. Nach Festlegung der einzelnen Lose[18] und Güten, nach denen die in HOLZERNTE eingespeisten Einzelbaumdaten sortiert bzw. eingeteilt werden sollen, werden folgende Größen in einer mit dem Programm verknüpften Datenbank für jeden einzelnen Stammabschnitt ausgegeben (s. Abbildung 19).



Baum_Nr	Los_Nr	Ba	HKS_Sorte_Nr	HKS_Sorte	Sortiment	HKS_Klasse	HKS_Güte_Nr	HKS_Güte	Kurzholz	Lage	abgelaengt	entrindet	Anzahl	BHD	Hoehe	Hazopf	Hdgren	Azopf	Mdm	Laenge	Volum_mR	Volum_oR
1	1	1	1	STH	PZ kurz	L3a	4	B	Ja	2	Nein	Nein	1	40.1	21.3	18.74	18.74	7	33.08	5	0.4780268	0.4297477
1	1	1	1	STH	PZ kurz	L2b	4	B	Ja	2	Nein	Nein	1	40.1	21.3	18.74	18.74	7	27.41	4	0.2656048	0.236032
1	3	1	1	STH	STH	L2a	5	C	Ja	2	Nein	Nein	1	40.1	21.3	18.74	18.74	7	23.71	2.4	0.1196065	0.1059517
1	3	1	1	STH	STH	L2a	5	C	Ja	2	Nein	Nein	1	40.1	21.3	18.74	18.74	7	20.07	2.4	0.08695806	0.07595491
1	4	1	3	IS	IS 2m		10	IN	Ja	3	Nein	Nein	1	40.1	21.3	18.74	18.74	7	16.34	2	0.04795018	0.04027798
1	4	1	3	IS	IS 2m		10	IN	Ja	3	Nein	Nein	1	40.1	21.3	18.74	18.74	7	11.04	2	0.02196055	0.01837303
1	101	1	4	NV-Derbholz	Restderbholz		0		Nein	3	Nein	Nein	1	40.1	21.3	18.74	18.74	7	7.343	0	0.00287259	0.002494277
2	1	1	1	STH	PZ kurz	L3a	4	B	Ja	2	Nein	Nein	1	37.8	21.9	19.32	19.32	7	31.29	5	0.4282959	0.3843946
2	1	1	1	STH	PZ kurz	L2b	4	B	Ja	2	Nein	Nein	1	37.8	21.9	19.32	19.32	7	26.19	4	0.2427125	0.2154722
2	3	1	1	STH	STH	L2a	5	C	Ja	2	Nein	Nein	1	37.8	21.9	19.32	19.32	7	22.89	2.4	0.1115435	0.09873315
2	3	1	1	STH	STH	L1b2	5	C	Ja	2	Nein	Nein	1	37.8	21.9	19.32	19.32	7	19.79	2.4	0.08367867	0.07383285
2	3	1	1	STH	STH	L1b1	5	C	Ja	2	Nein	Nein	1	37.8	21.9	19.32	19.32	7	15.74	2.4	0.05358649	0.04669268
2	4	1	3	IS	IS 2m		10	IN	Ja	3	Nein	Nein	1	37.8	21.9	19.32	19.32	7	11.05	2	0.02200777	0.01841272
2	101	1	4	NV-Derbholz	Restderbholz		0		Nein	3	Nein	Nein	1	37.8	21.9	19.32	19.32	7	7.488	0	0.00374773	0.003254737

Abbildung 19: MS Access-Tabelle mit Informationen zu den entstandenen Stammabschnitten

Die exakte Vorgehensweise bei der Definition unterschiedlicher Sortierungsvarianten, die der Nutzer in HOLZERNTE einstellen kann, wird ausführlich in Anhang X beschrieben.

[18] Unter einem „Los“ versteht man die Zusammenfassung von Stammabschnitten eines bestimmten Sortiments in einem bestimmten Hieb (z.B. fünf Meter lange Abschnitte mit der Qualität B). In einem Hieb werden i.d.R. immer mehrere Lose ausgehalten. Diese Aushaltung wird vor jeder Hiebsmaßnahme individuell festgelegt.

4.3.3 Zusammenführung der gewonnen Informationen in einer zentralen Datenbank

Man besitzt nun zum einen eine Liste mit Daten über die Einzelbäume des gesamten Bestandes inklusive Kennzeichnung der Erntebäume, zum anderen eine Liste mit dazugehörigen Stammabschnitts- oder auch Sortimentsinformationen. Diese beiden Listen müssen nun miteinander verknüpft werden (s. Abbildung 20), da sonst bei einer Simulation der Holzernte im Modell zwar die entsprechend markierten Bäume gefällt werden, dabei aber keinerlei Produkte, also Stämme oder Stammabschnitte entstehen würden.

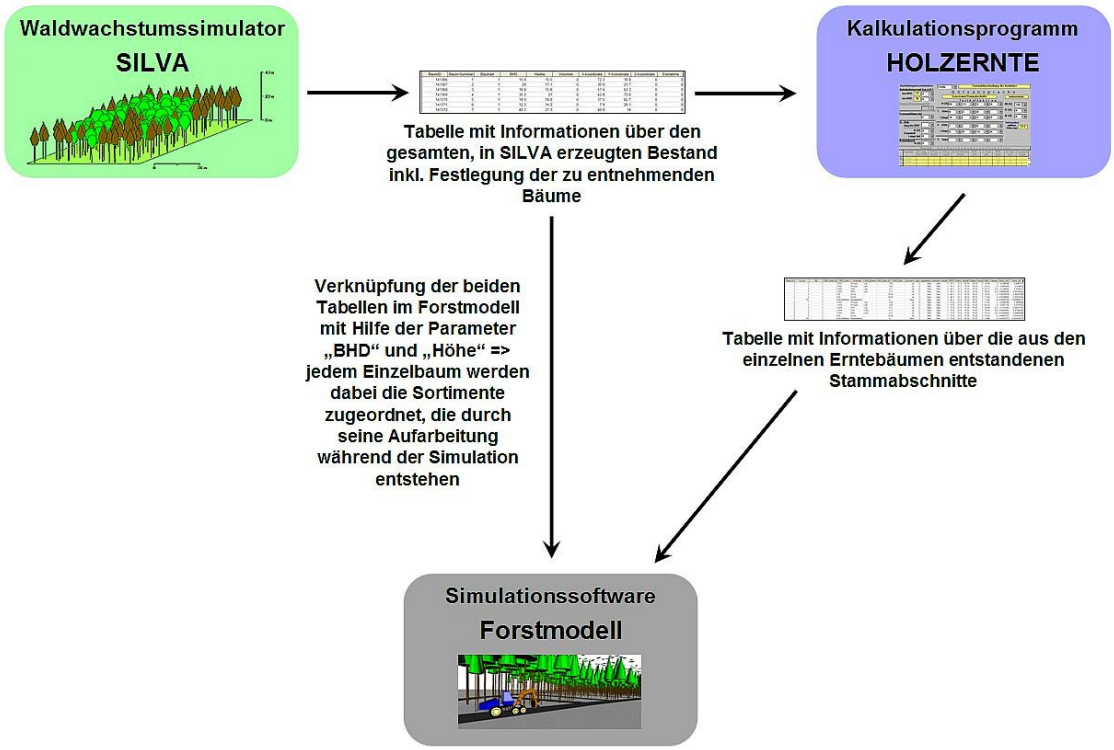


Abbildung 20: Berechnung und Verknüpfung der Bestandes- und Sortimentstabellen

Diese Verknüpfung wird in MS Access ebenfalls mit Hilfe spezieller Abfragen durchgeführt. Dabei werden von jedem Baum die Werte der Parameter „BHD“ und „Höhe“ aus der SILVA-Tabelle des gesamten Bestandes mit denen aus der Tabelle mit Sortimentsinformationen verglichen (s. Abbildung 21). Werden identische Werte in beiden Tabellen entdeckt, kommt es automatisch zu einer Verknüpfung der Daten. Jedem Baum werden somit diejenigen „Produkte“ zugeteilt, die aus ihm entstehen werden.

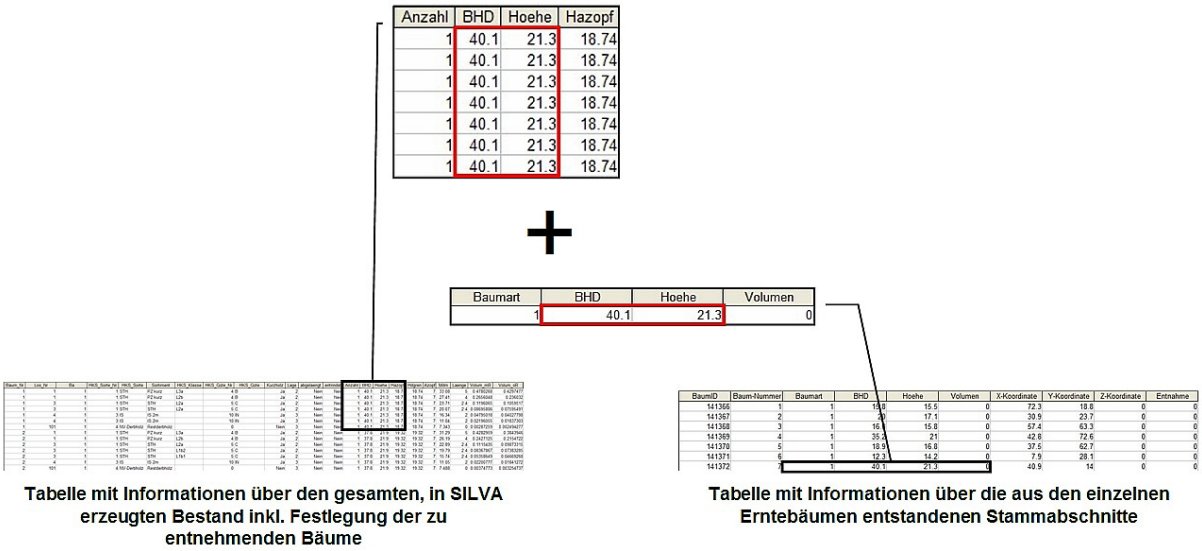


Tabelle mit Informationen über den gesamten, in SILVA erzeugten Bestand inkl. Festlegung der zu entnehmenden Bäume

Tabelle mit Informationen über die aus den einzelnen Erntebäumen entstandenen Stammabschnitte

Abbildung 21: Verknüpfung der Bestandesdaten mit den Sortimentsinformationen

Je nachdem, ob es sich bei der Modellierung der Bäume nur um eine oder aber um mehrere Bestandesflächen handelt, müssen die Bäume den jeweiligen Flächen zugeteilt werden. Dies geschieht durch eine Überprüfung jeder einzelnen Baumposition. Dabei werden die Koordinaten des Baumes mit denen der jeweiligen Abteilungsfläche abgeglichen. Die Abteilungsfläche wird zuvor im Quellcode des Modells über ihre Eckpunkte definiert. Zum Teil ist es dabei notwendig, die einzelnen Flächen erneut in Dreiecksflächen zu unterteilen, da nicht alle Begrenzungslinien gerade verlaufen.

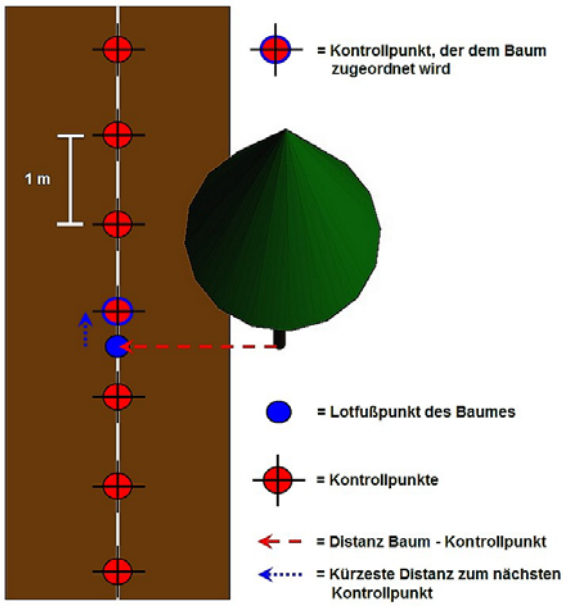


Abbildung 22: Zuordnung eines Kontrollpunktes zu einem Baum

Wichtig für einen Einzelbaum ist neben den Informationen über die eigene Position auch zu „wissen“, welches seine **„Bezugsrückegasse“** ist. Unter einer Bezugsrückegasse ist diejenige Rückegasse zu verstehen, die sich am nächsten zu dem im Bestand stehenden Baum befindet. Auf den Gassen sind im Abstand von jeweils einem Meter so genannte „**Kontrollpunkte**“ installiert (s. Abbildung 22).

Derjenige Kontrollpunkt, der sich vom Stammfußpunkt aus gesehen am nächsten zum Lotfußpunkt[19] des entsprechenden Baumes befindet, wird diesem zugeteilt. Die dazugehörige Gasse wird ihm in der Datenbank ebenfalls direkt zugeordnet. In der Datenbank wird zusätzlich der **genaue Wert der Entfernung** vom Baum zum Kontrollpunkt gespeichert, da er als Variable in eine Produktivitätsformel des Harvesters einfließt. Während einer Holzerntesimulation wird der Baum dann vom zuvor festgelegten Kontrollpunkt der Bezugsgasse aus durch den Harvester gefällt bzw. werden die aus ihm gewonnenen Sortimente an diese Gasse durch den Harvester, den Schlepper oder das Pferd vorgerückt. Ein vorgelieferter Stamm oder Stammabschnitt wird an einem speziell definierten „**Ablagepunkt**“ platziert. Dieser Ablagepunkt liegt immer genau drei Meter entfernt von der Gassenmitte auf der senkrechten Verbindung des Baumfußpunktes zum dazugehörigen Lotfußpunkt (s. Abbildung 23 und Abbildung 24).

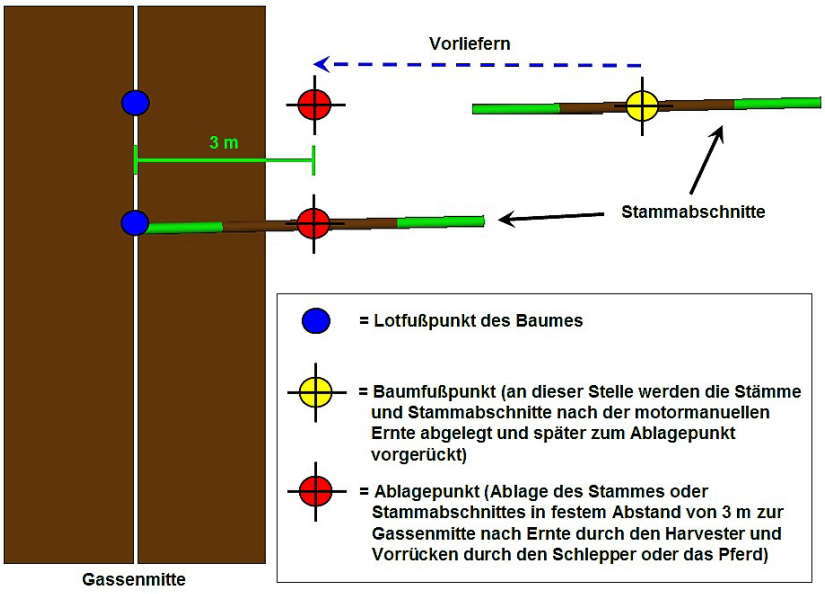
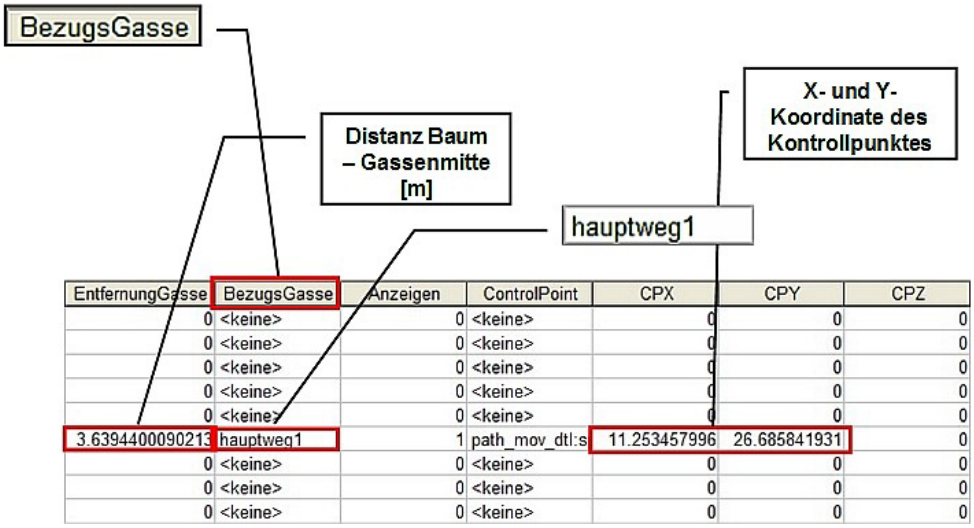


Abbildung 23: Ablagepunkte zur Platzierung der Stämme und Stammabschnitte in vordefiniertem Abstand von 3 m an der Rückegasse

Zusätzlich wurde bei der Programmierung des Modells dafür gesorgt, dass die Stämme und Stammabschnitte bei der graphischen Darstellung immer senkrecht zur entsprechenden Rückegasse oder Forststraße positioniert werden. Der entsprechende **Rotationswinkel** wird dabei automatisch in der Datenbank berechnet und AutoMod für die graphische Darstellung zur Verfügung gestellt. Dieses Vorgehen entspricht dem realen Arbeitsablauf und trägt damit zu einer Abbildung tatsächlicher Ernte- und Rückevorgänge bei.

[19] Unter einem Lotfußpunkt ist derjenige Punkt zu verstehen, der durch eine Gerade im rechten Winkel von der Mitte der entsprechenden Forststraße oder Rückegasse mit dem Stammfußpunkt des jeweiligen Baumes verbunden ist.



EntfernungGasse	BezugsGasse	Anzeigen	ControlPoint	CPX	CPY	CPZ
0	<keine>	0	<keine>	0	0	0
0	<keine>	0	<keine>	0	0	0
0	<keine>	0	<keine>	0	0	0
0	<keine>	0	<keine>	0	0	0
0	<keine>	0	<keine>	0	0	0
3.6394400090213	hauptweg1	1	path_mov_dtl:s	11.253457996	26.685841931	0
0	<keine>	0	<keine>	0	0	0
0	<keine>	0	<keine>	0	0	0
0	<keine>	0	<keine>	0	0	0

Abbildung 24: Automatische Zuordnung jedes Erntebaumes zu einer Bezugsrückegasse bzw. zu einem Kontrollpunkt und Berechnung der Distanz in Meter

Ein Baum wird also im Verlauf der Positionierung mit Informationen darüber versehen, ob er sich überhaupt auf der Bestandesfläche befindet, welcher Rückegasse bzw. welchen Kontroll- und Ablagepunkten er zugeordnet und in welcher Abteilung er „aufgestellt“ wird. Die Zuordnung zu einer Abteilung ist notwendig, da es an bestimmten Stellen bei der Verteilung der Quadranten über die Fläche zu einer Überschneidung kommen kann (s. Abbildung 25).

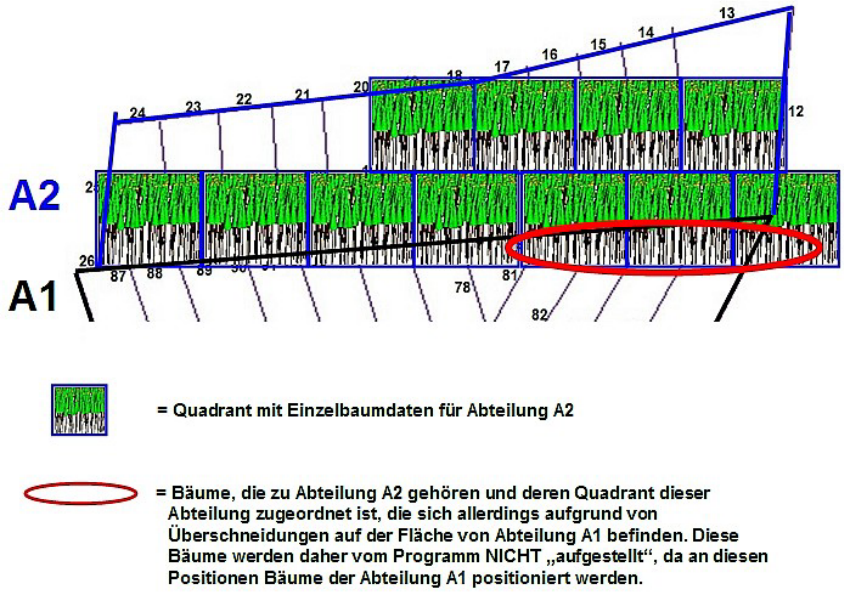
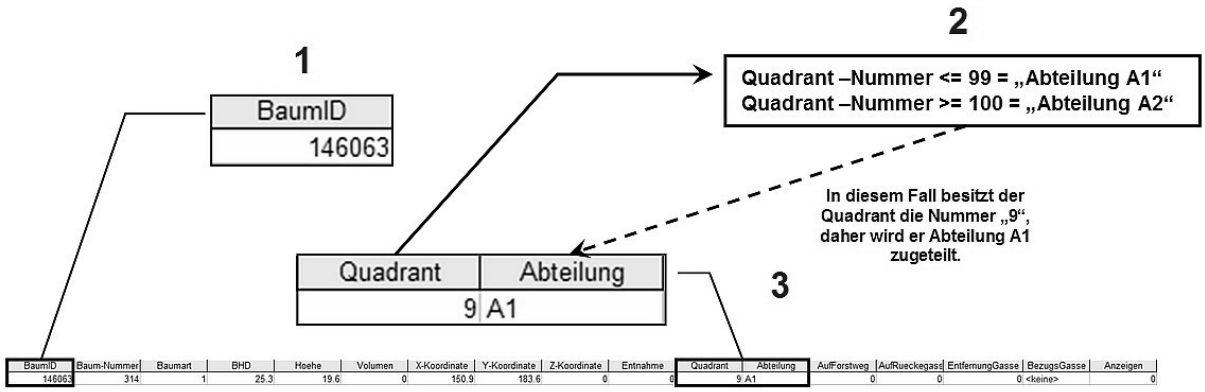


Abbildung 25: Überschneidung von Bestandesfläche und Quadranten

Hier kann wiederum mit speziellen Abfragen in MS Access gearbeitet werden. In diesem Fall wird berücksichtigt, auf welchem Flächenteil (z.B. „Abteilung A1“) sich die einzelnen Quadranten befinden. Die Codierung wurde im aktuellen AutoMod-Modell des Testbestandes so vorgenommen, dass alle Quadranten, die sich auf der Fläche „Abteilung A1“ befinden, mit einer zweistelligen Zahl beschrieben werden (z.B. „Quadrant 63“). Wird ein Quadrant auf der Fläche „Abteilung A2“ aufgestellt, bekommt er eine dreistellige Zahl (z.B. „Quadrant 103“). Eine entsprechend formulierte Abfrage ordnet dann jeden einzelnen Baum nach folgendem Prinzip einer Bestandesfläche zu (s. Abbildung 26):



1 = Eine ID-Nummer wird für jeden Einzelbaum vergeben.

2 = Es wird überprüft, in welchem Quadranten sich „Baum 146063“ befindet => er steht in Quadrant 9

3 = Quadrant 9 gehört nach festgelegter Definition zu „Abteilung A1“. Diese Information wird automatisch in die Baumdatenbank übernommen.

4 = Im Anschluss überprüft das System, ob sich der Baum in Abteilung A1 befindet, indem er seine Positionskoordinaten mit den Flächenkoordinaten abgleicht.

Abbildung 26: Zuordnung der Abteilungsnummern zu den Einzelbäumen mit Hilfe der Quadranten-Nummern

Für jeden einzelnen Baum wird schließlich geprüft, ob er Teil der ihm zugewiesenen Abteilung ist. Wird z.B. ein Baum der Abteilung „A2“ zugeordnet, überprüft das Programm, ob er tatsächlich auf dieser Fläche steht. Es prüft also nicht, ob der Baum beispielsweise in Abteilung „A1“ positioniert ist.

4.3.4 Entity-Relationship-Diagramme

Abbildung 27: Entity-Relationship-Diagramm für die Daten des Forstmodells

Die in Abbildung 27 und Abbildung 28 aufgeführten Entity-Relationship-Diagramme[20] zeigen, dass zwischen den einzelnen Tabellen der Systemdatenbank bzw. zwischen den enthaltenen Informationen kaum Beziehungen bestehen. In Abbildung 27 extistiert eine Verknüpfung zwischen der EST-Zuordnung im Programmmenü Motormanuelle Holzernte (s. Kapitel 5.6.2) und der dort entsprechend ausgewählten EST-Tabelle, die in der Datenbank hinterlegt ist. Allerdings werden auch diese beiden Informationen getrennt in Textdateien herausgeschrieben und erst in AutoMod selbst miteinander verknüpft. Diese Verknüpfung könnte aber theoretisch auch schon in der Datenbank selbst erfolgen.
Die in Abbildung 27 gezeigte Tabelle „Fahrzeuge_Standardwerte“ bezieht sich auf den Fall, dass im Modell eine **Maschinendatenbank** hinterlegt wird. Dort kann der Nutzer für verschiedene Maschinentypen Standardwerte festlegen, die dann durch Auswahl im Frontend automatisch übernommen werden.

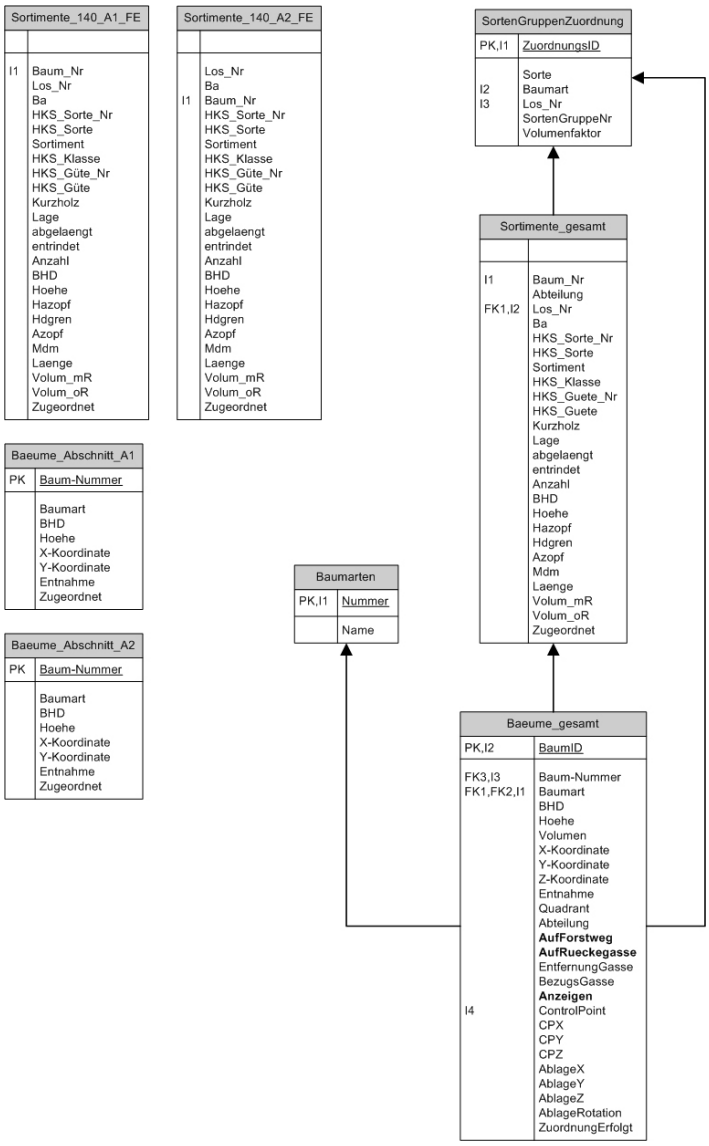


Abbildung 28: Entity-Relationship-Diagramm für die Baumdaten

[20] Die graphische Darstellung von Entitätstypen und Beziehungstypen wird Entity-Relationship-Diagramm (ERD) oder ER-Diagramm genannt (WIKIPEDIA, 2006).

In Abbildung 28 handelt es sich bei den Tabellen „Baeume_Abschnitt_A1“ und „Baeume_Abschnitt_A2“ um die aus SILVA gewonnenen Einzelbaumdaten für die Abteilungen A1 und A2. Sie beinhalten die benötigten Bestandesdaten und fungieren als „Ausgangsquadranten“ mit einer Fläche von bis zu einem Hektar, die dann im weiteren Verlauf mit Hilfe einer speziellen Abfrage „geklont“ werden. Aus ihnen entsteht durch das „Klonen“ der Einzelbäume die Tabelle „Baeume_gesamt“.

Die Tabellen „Sortimente_140_A1_FE“ und „Sortimente_140_A2_FE“ enthalten die Daten zu den einzelnen Sortimenten, die mit dem Programm HOLZERNTE erzeugt wurden und werden in der Tabelle „Sortimente_gesamt“ zusammengeführt. Diese Tabelle enthält also nur jeweils einen Satz Sortimente, allerdings für beide Ausgangsbestände zusammengefasst.

Unter Einsatz der Verknüpfungsgrößen „BHD“ und „Höhe“ werden dann die Tabellen „Baeume_gesamt“ und „Sortimente_gesamt“ miteinander gekoppelt. Jedem Baum jedes Quadranten ist dann ein Satz Sortimente aus der Tabelle „Sortimente_gesamt“ zugeordnet.

Zusätzlich besteht noch eine Verbindung zu den Voreinstellungen der Sortengruppen-Zuordnungen für die Forwarder-Rückung und den im Frontend aufgeführten Baumarteninformationen.

4.3.5 Übersicht Gesamtablauf

Als Abschluss der Erläuterungen zur Gewinnung und Aufbereitung der Daten des aufstockenden und ausscheidenden Bestandes ist in Abbildung 29 der Gesamtablauf dargestellt. Dieser Gesamtablauf bezieht sich allerdings auf das komplette Modell, d.h. inklusive der Simulation. Das Diagramm soll helfen, die Verständlichkeit der einzelnen Prozesse weiter zu verbessern.

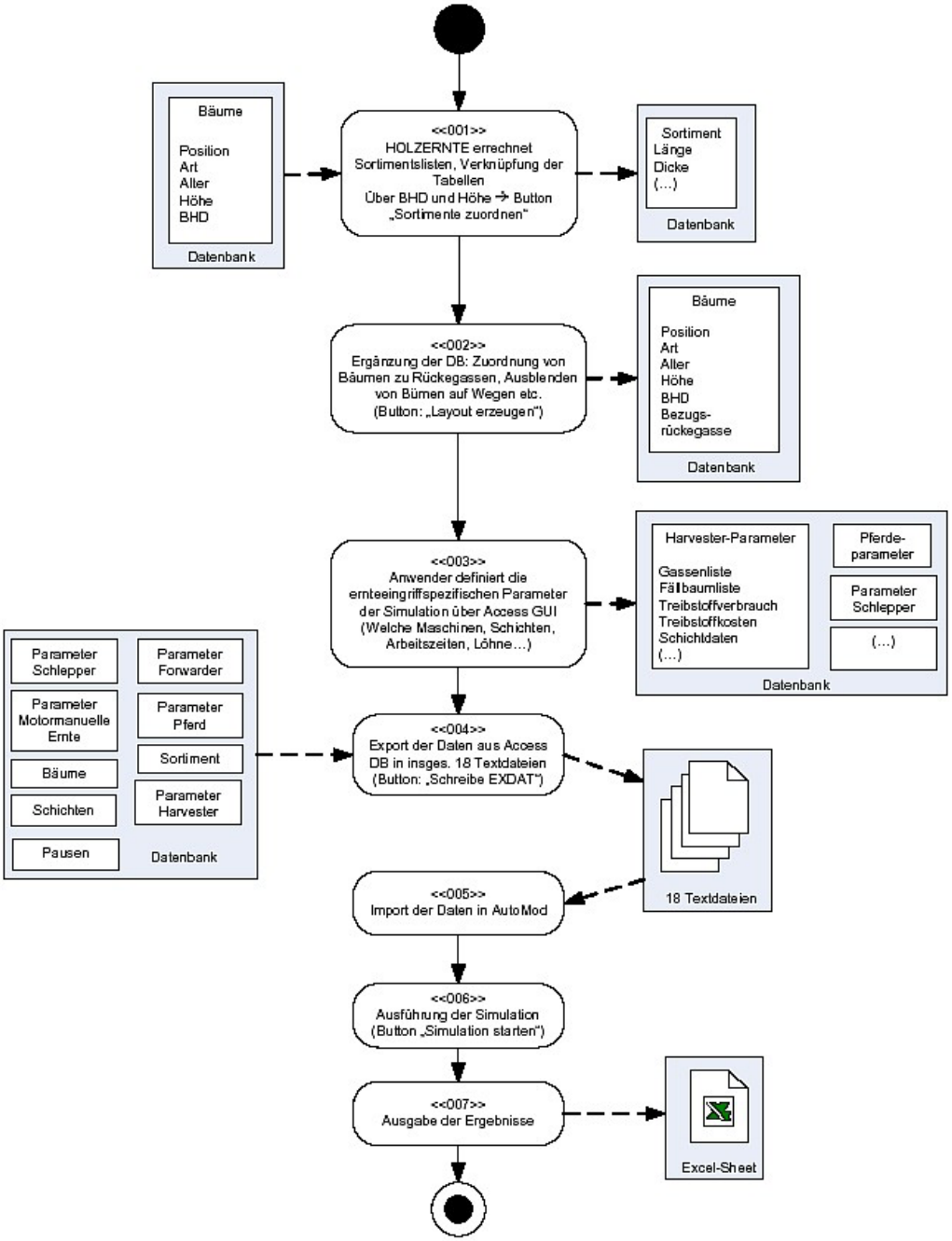


Abbildung 29: Darstellung des übergeordneten Ablaufs im Modell

5. Aufbau einer Holzerntesimulation

In diesem Kapitel werden der genaue Aufbau sowie sämtliche Teilprozesse des entwickelten Holzerntemodells erläutert. Die einzelnen Prozesse werden in speziellen Ablaufdiagrammen in UML (Unified Modeling Language[21]) oder UML-ähnlichen Darstellungen präsentiert. Zusätzlich werden die Diagramme durch Texte ergänzt, die zum besseren Verständnis der Graphiken beitragen.

5.1 Benutzerfreundlichkeit

Es ist davon auszugehen, dass sich unter den zukünftigen Nutzern der Software kaum ausgewiesene EDV-Experten befinden werden. Bei der Entwicklung der Simulationssoftware muss daher der Benutzerfreundlichkeit oberste Priorität eingeräumt werden. Unabhängig von allen anderen Funktionsmöglichkeiten muss gewährleistet sein, dass ein potenzieller Nutzer in angemessener Zeit und ohne besonders großen Lernaufwand in der Lage ist, alle notwendigen Voreinstellungen in den entsprechenden Menüs zu treffen und den Simulationslauf zu starten.
Das auf der Basis von AutoMod zu entwickelnde Modell wird unter der Prämisse einer möglichst großen Benutzerfreundlichkeit konzipiert. Dennoch ist es aus Zeit- und Kostengründen nicht immer möglich, alle wünschenswerten Optionen und Vereinfachungen mit einzubeziehen.
Im Folgenden wird nun zuerst die Benutzeroberfläche – das so genannte Frontend[22] – vorgestellt und ihre Funktionen im Einzelnen erläutert.

5.2 Menüfunktionen

Die Benutzeroberfläche des AutoMod-Modells wird mit Hilfe der Software MS Access entwickelt, da hier auch sämtliche für eine Simulation benötigten Datentabellen verwaltet werden. Zuerst wird ein Überblick über das „Eröffnungsmenü“ gegeben, welches der Nutzer beim ersten Öffnen des Frontends zu sehen bekommt (s. Abbildung 30).

[21] Die Unified Modeling Language ist eine von der Object Management Group (OMG) entwickelte und standardisierte Sprache für die Modellierung von Software und anderen Systemen. Im Sinne einer Sprache definiert die UML dabei Bezeichner für die meisten Begriffe, die für die Modellierung wichtig sind, und legt mögliche Beziehungen zwischen diesen Begriffen fest. Die UML definiert weiter grafische Notationen für diese Begriffe und für Modelle von statischen Strukturen und von dynamischen Abläufen, die man mit diesen Begriffen formulieren kann (BALZERT, 2005).

[22] Als Frontend wird ein Computerprogramm bezeichnet, das zur interaktiven Anforderung, Eingabe sowie Anzeige von Daten verwendet wird. Dabei ist es mit einem oder mehreren anderen Programmen verbunden, welche auf dem gleichen oder anderen Rechnern im Hintergrund laufen und welche die Verarbeitung, Verwaltung, Speicherung, u. Ä. dieser Daten übernehmen (BROOKS, 2003).

Es stehen folgende Verfahrensschritte für eine Simulation zur Verfügung:

- Holzernte durch den Harvester
- Motormanuelle Holzernte
- Vorrücken des Holzes durch das Pferd
- Vorrücken des Holzes mit Hilfe eines Zangenschleppers mit Seilwinde
- Rückung des Holzes mit Hilfe eines Zangenschleppers
- Rückung des Holzes mit Hilfe eines Forwarders

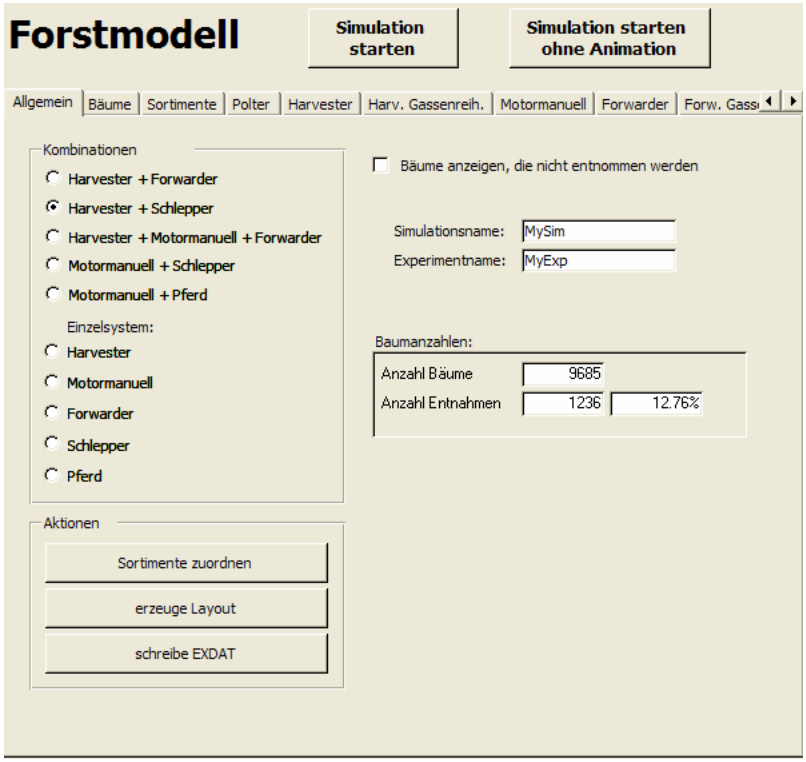


Abbildung 30: Allgemeine Übersicht der Benutzoberfläche des Frontends inkl. Auswahl der Arbeitssysteme

Das Modell gibt dem Benutzer die Möglichkeit, die Erntesysteme (Harvester + Motormanuelle Holzernte) sowie die Vorrück- und Rückesysteme entweder einzeln zu simulieren oder in den folgenden Kombinationen auszuwählen:

- Holzernte durch den Harvester, Rückung durch den Forwarder
- Holzernte durch den Harvester, Rückung durch den Zangenschlepper
- Holzernte durch den Harvester + Fällung der nicht für den Harvester erreichbaren Bäume durch Waldarbeiter (keine Zufällung!), Rückung durch Forwarder
- Motormanuelle Holzernte, Vorrücken und Rücken durch Zangenschlepper
- Motormanuelle Holzernte und Aufarbeitung, Vorrücken durch das Pferd

Das Frontend

Nach dem Öffnen des Modells erhält der Nutzer im Frontend zunächst einen Überblick über die entsprechenden Auswahl- und Einstellungsmöglichkeiten (s. Abbildung 30). Neben der Übersicht über die Arbeitssysteme wird ihm direkt angezeigt, wie viele Bäume sich im aktuell zu simulierenden Bestand befinden und welche Anzahl von ihnen geerntet werden soll (s. Abbildung 31). Diese Informationen werden automatisch aus den vorab verknüpften Baumtabellen ermittelt.

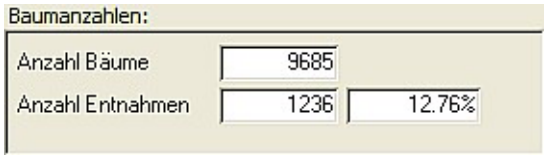


Abbildung 31: Gesamtanzahl der Bestandesbäume + Anzahl zu erntender Bäume

Jeder Simulationslauf kann mit allen zuvor festgelegten Einstellungen unter einem eigenen Simulations- und Experimentnamen abgespeichert werden. Außerdem ist es möglich, bei der Simulation mit graphischer Unterstützung entweder nur diejenigen Bäume anzeigen zu lassen, die tatsächlich geerntet werden sollen oder den kompletten Bestand mit allen Bäumen sichtbar zu machen (s. Abbildung 32). Diese Option erlaubt eine Verringerung der Rechenzeiten für das Modell während der Simulation und kann sich bei großen Baumzahlen positiv auf den Zeitverbrauch auswirken.

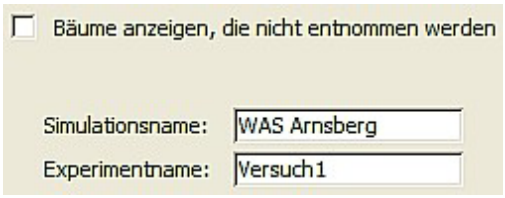


Abbildung 32: Auswahl der angezeigten Bäume + Vergabe von Simulations- und Experimentnamen

Ebenso ist der Nutzer in diesem Teil des Frontends in der Lage, unterschiedliche Aktionen durchzuführen (s. Abbildung 33):

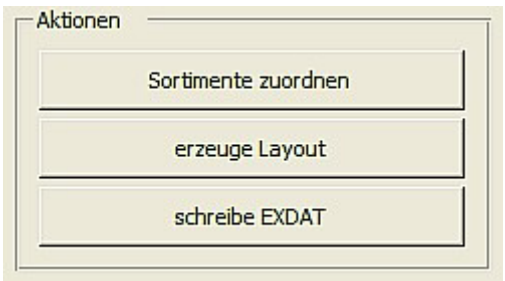


Abbildung 33: Ausführbare Aktionen

Sortimente zuordnen

Diese Aktion bezieht sich auf das Einpflegen neuer Bestandesinformationen in Form von Baumlisten im MS Access-Datenbankformat. Der Vorgang dauert nur wenige Minuten und ist nur bei einer vorangegangenen Veränderung der Baum- und/oder Sortimentsinformationen nötig.

Erzeuge Layout

Als Erzeugung des Layouts bezeichnet man die rechnerische Zuordnung der Bäume zur Bestandesfläche. Während dieses Rechenvorgangs werden die Bäume auf der Bestandesfläche „aufgestellt“ und erhalten ihre entsprechende Bezugsrückegasse (vgl. Kapitel 4.3.3). Des Weiteren werden zusätzliche Parameter berechnet, z.B. die Distanz des Baumes zu seiner Bezugsgasse oder der Rotationswinkel für die graphische Darstellung der Ablage von Sortimenten. Der Rechenvorgang dauert einige Minuten, muss aber lediglich nach einer Veränderung der Baumdatenbank durchgeführt werden.

Schreibe EXDAT (Externe Daten)

Damit die gesammelten Daten in die Simulation übergeben werden können, müssen diese in Textdateien exportiert werden. Ändert der Nutzer z.B. im Einstellungsfenster des Harvesters einen oder mehrere Parameter, so können diese erst nach Erzeugung der EXDAT in der anschließenden Simulation berücksichtigt werden. Diese Übernahme der neuen Einstellungen dauert lediglich einige Sekunden.

Auswahl der verschiedenen Arbeitssysteme

Ausgehend von der allgemeinen Übersicht des Frontends ist es nun möglich, die Einstellungen der verschiedenen Arbeitssysteme bezüglich der Maschinenparameter, Störungen, Schichten, Sortimente und Polter vorzunehmen. Um zu den Menüfeldern zu gelangen, kann der Nutzer über die Auswahlleiste das entsprechende Eingabefenster direkt auswählen (s. Abbildung 34).

Abbildung 34: Menüleiste des Frontends

Starten der Simulation

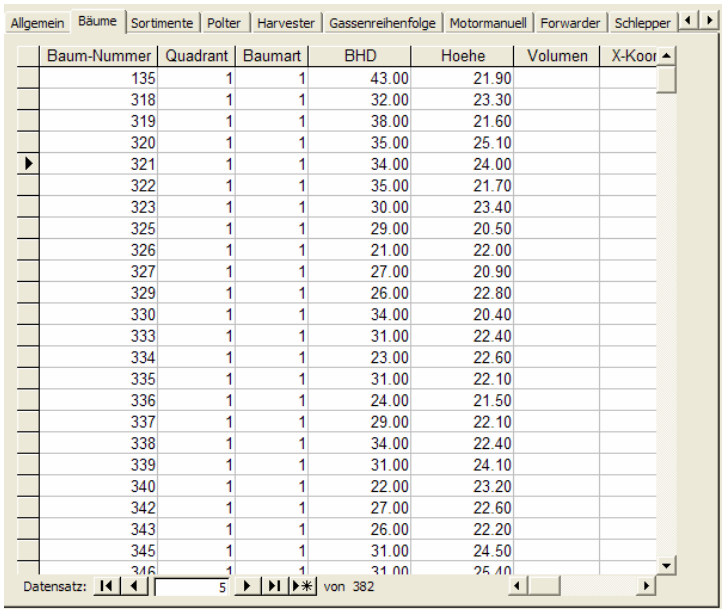
Sind alle Einstellungen wunschgemäß durchgeführt worden, kann mit der Simulation begonnen werden. An dieser Stelle bieten sich dem Nutzer zwei Wahlmöglichkeiten (s. Abbildung 35).

Abbildung 35: Bedienelemente zum Starten der Simulation

Zum einen kann die Simulation inklusive der graphischen Darstellung der ablaufenden Prozesse gestartet werden, zum anderen besteht die Option, ohne Graphik zu simulieren. Diese Möglichkeit führt zu einer deutlichen Verringerung der Berechnungszeit, erlaubt aber nicht das direkte Verfolgen der Erntemaßnahmen.

Die Baumlisten

Wie bereits erwähnt, hinterliegen dem Modell sämtliche zu simulierende Bäume in einer MS Access-Datenbank, die durch entsprechende Verknüpfung in das Bestandesmodell integriert wird. Im Frontend ist die aktuell hinterlegte Baumliste mit allen relevanten Informationen im Menüfeld „Bäume“ einzusehen (s. Abbildung 36).



Baum-Nummer	Quadrant	Baumart	BHD	Hoehe	Volumen	X-Koor
135	1	1	43.00	21.90		
318	1	1	32.00	23.30		
319	1	1	38.00	21.60		
320	1	1	35.00	25.10		
321	1	1	34.00	24.00		
322	1	1	35.00	21.70		
323	1	1	30.00	23.40		
325	1	1	29.00	20.50		
326	1	1	21.00	22.00		
327	1	1	27.00	20.90		
329	1	1	26.00	22.80		
330	1	1	34.00	20.40		
333	1	1	31.00	22.40		
334	1	1	23.00	22.60		
335	1	1	31.00	22.10		
336	1	1	24.00	21.50		
337	1	1	29.00	22.10		
338	1	1	34.00	22.40		
339	1	1	31.00	24.10		
340	1	1	22.00	23.20		
342	1	1	27.00	22.60		
343	1	1	26.00	22.20		
345	1	1	31.00	24.50		
346	1	1	31.00	25.40		

Abbildung 36: Baumliste des aktuell zugeordneten Bestandes

Zwei der im Frontend aufrufbaren Menüfenster beziehen sich auf Einstellungen, die nahezu alle Arbeitssysteme betreffen. Dabei handelt es sich um die Fenster „Störungen“ und „Schichten“.

Störungen

Dieses Modul dient der Definition des weiteren Systemverhaltens in der folgenden Simulation hinsichtlich der auftretenden Unterbrechungen. Da sowohl in der Praxis, als auch im Modell keine genauen Angaben über das Auftreten von Störungen und die zeitlichen Abstände zwischen diesen gemacht werden können, muss auf ein Annäherungsverfahren zurückgegriffen werden. Für dieses Annäherungsverfahren sind die Werte MTBF (Mean Time Between Failure), MTTR (Mean Time To Repair) und die technische Verfügbarkeit notwendig (diese wird im Modell durch einen Prozentanteil von Maschinenarbeitsstunden zu Unterbrechungen ausgedrückt). Nach dem Auslösen einer Störung wird ermittelt, ob die vorgegebene Verfügbarkeit mit der tatsächlichen Verfügbarkeit übereinstimmt. Ist die tatsächliche Verfügbarkeit größer als die Vorgabe, müssen die zukünftigen Störungen näher beieinander liegen, um die Vorgaben zu erfüllen. Aus diesem Grund wird die MTBF verringert. Ist die tatsächliche Verfügbarkeit kleiner als die Vorgabe, müssen die Störungen weiter auseinander liegen, damit die Vorgabe erfüllt werden kann.
Das Modul arbeitet also im Wesentlichen mit dem in Prozent ausgedrückten Verhältnis von Gesamtarbeitszeit (GAZ) zu Reiner Arbeitszeit (RAZ) bzw. zu den Allgemeinen Zeiten (AZ). Dabei wird die GAZ immer als 100 %-Wert angesehen. Der Nutzer ist nun in der Lage, im Menü des Harvesters oder Forwarders für die RAZ einen bestimmten Prozentwert (z.B. 70 %) anzugeben. Dies bedeutet, dass während der Simulation 70 % der GAZ (unabhängig von ihrer tatsächlichen Länge) Reine Arbeitszeiten, ausgedrückt in MAS15[23], sein sollen. Im Umkehrschluss beträgt die Dauer der AZ demnach 30 % der GAZ. Die Allgemeinen Zeiten sind im Modul in die Kategorien RWS (Reparatur- und Wartungsstunden), WUS (Wege- und Umsetzstunden) und AFS (Sonstige Ausfallstunden) unterteilt. Auch diesen Kategorien kann der Nutzer einen Prozentwert zuordnen. Dabei werden die 30 % der AZ wieder 100 % gesetzt, und diese 100 % können dann über die drei Kategorien verteilt werden (s. Abbildung 37).
Die Dauer einer solchen Unterbrechung wird automatisch für jede einzelne Kategorie aus einer Dreiecksfunktion, bestehend aus einem minimalen, einem maximalen und einem wahrscheinlichsten Wert entnommen und bezieht sich auf die durch den Nutzer festgelegte Schichtlänge.

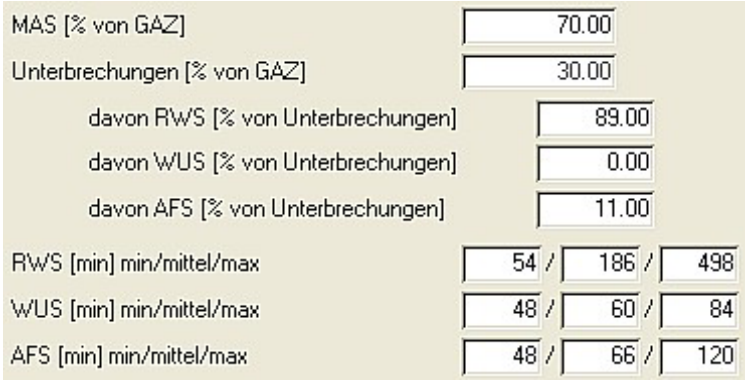


Abbildung 37: Das Störzeiten-Modul

[23] Als MAS15 wird eine Maschinenarbeitsstunde inkl. aller Unterbrechungen < 15 Minuten bezeichnet (LÖFFLER, 1991).

Die Berechnungen, wann eine Unterbrechung beginnt und wie lange sie dauern wird, erstellt das Modell dynamisch. Dies bedeutet, dass die erste Unterbrechung rein zufällig innerhalb der ersten Schicht mit einer zufällig aus der entsprechenden Dreiecksfunktion ermittelten Dauer eintreten wird. Ist die Unterbrechung beendet, überprüft das Modell automatisch das aktuelle Verhältnis RAZ:AZ. Dauert die Unterbrechung so lange, dass das in diesem Fall gewählte Verhältnis von 70:30 überschritten wurde (z.B. 60:40), wird die nächste Störung erst zu einem späteren Zeitpunkt auftreten. Dadurch verstreicht wieder mehr Reine Arbeitszeit, das Verhältnis verschiebt sich demnach in die voreingestellte Richtung (70:30). Umgekehrt führt eine zu kurze Unterbrechung dazu, dass die kommende Störung nicht allzu lange auf sich warten lassen wird.
Damit dieses Annäherungsverfahren funktionieren kann, müssen mehrere Störungen auftreten. Bereits drei bis vier simulierte Störungen reichen dabei aus, um sich mit der tatsächlichen Verfügbarkeit der Maschine im Modell präzise an die Vorgabe anzunähern. Der Grund dafür liegt darin, dass dieses dynamisch rechnende Verfahren eine gewisse Mindestarbeitszeit benötigt, um sich „einzupendeln“. Einen genauen Überblick über die Abläufe innerhalb des Störungsmoduls gibt Abbildung 38.

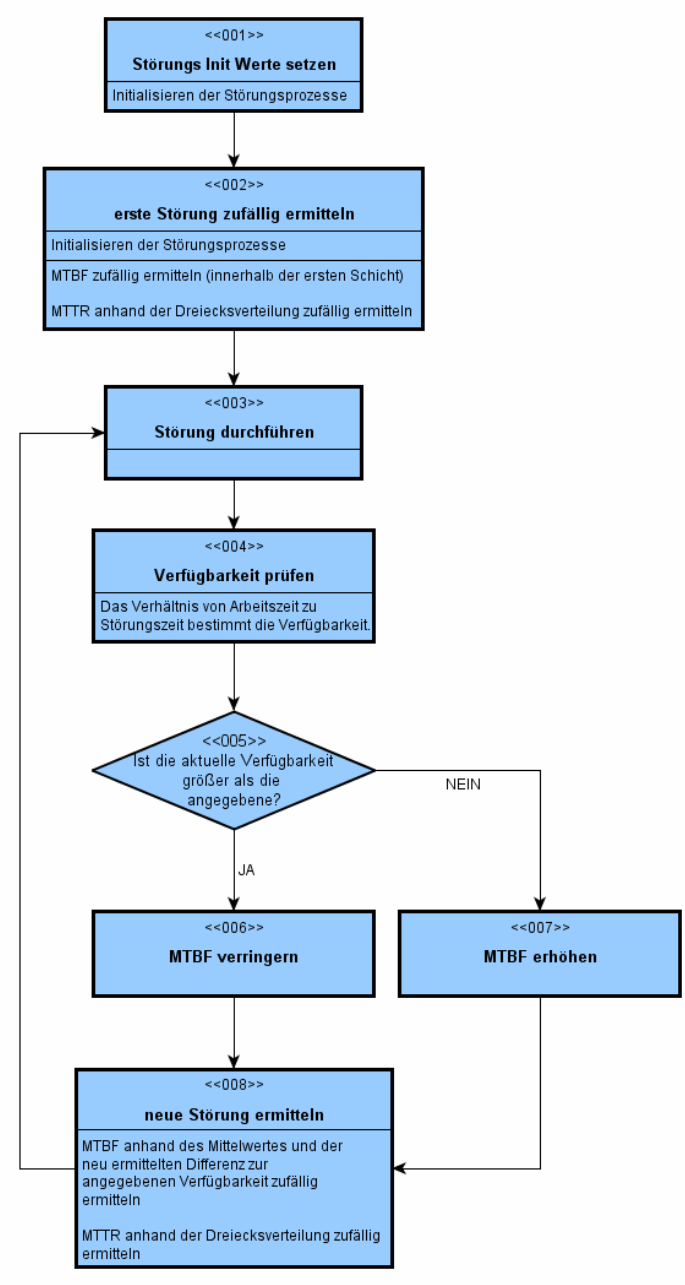


Abbildung 38: Ablaufdiagramm für das Störzeitenmodul

001: Zu Beginn der Simulation werden die Störungsprozesse initialisiert.

002: Innerhalb der ersten Schicht wird dann die erste Störung (MTBF) zufällig ermittelt. Deren Dauer (MTTR) wird mit Hilfe einer entsprechenden Dreiecksfunktion bestimmt.

003: Die Störung wird ausgeführt, alle Systemfunktionen liegen still.

004: Nach Auflösen der Störung wird das Verhältnis von RAZ zur bisherigen Störungszeit berechnet und die aktuelle Verfügbarkeit des Systems geprüft.

005: Dabei wird untersucht, ob die aktuelle Verfügbarkeit größer ist als die vom Nutzer im Frontend vorgegebene.

006: Ist dies der Fall, muss der Zeitraum bis zur nächsten Unterbrechung (MTBF) entsprechend verringert werden.

007: Umgekehrt wird die MTBF erhöht, wenn die aktuelle Verfügbarkeit niedriger ausfällt als die Voreinstellung es vorgibt. Das bedeutet, die nächste Unterbrechung wird erst nach längerer Zeit auftreten.

008: In diesem Prozess wird die neu auftretende Störung ermittelt. Dabei fließen bei der Bestimmung des MTBF sowohl das durchschnittliche Verhältnis von RAZ zu GAZ mit ein, als auch die Differenz zur vorgegebenen Verfügbarkeit. Die Dauer der Störung (MTTR) wird wiederum mit Hilfe einer Dreiecksfunktionen bestimmt. Es geht im Anschluss weiter mit Prozess **003**.

Schichten

Um das Modell so realitätsnah wie möglich arbeiten zu lassen, wird die Simulationszeit in tatsächliche 24-Stunden-Tage aufgeteilt. Aus diesem Grund wird das hier beschriebene Schichtmodell (Abbildung 39) mit den entsprechenden Arbeitssystemen verknüpft. Es besteht die Möglichkeit, für jedes System eine Startzeit, eine Schichtdauer sowie für die Systeme Harvester und Forwarder zusätzliche Pausenzeiten, angegeben in Minuten, einzustellen. Diese Zeiten werden dann während der Simulation angewendet und ermöglichen auf diese Weise den Ablauf eines realen Arbeitstages inklusive „Feierabend“ (Stillstand der Maschinen).

Schichten

	ResourcePtr	LabelPtr	Beginn	Dauer
	R_Harvester	Labels.Harv_Label	0	660
	R_Forwarder	Labels.Forw_Label	1440	660
	R_Pferd	Labels.Pferd_Label	0	660
	R_MM	Labels.MM_Label	0	660
	R_Schlepper	Labels.Schlepper_Label	660	660
*			0	0

Datensatz: 5 von 5

Pausen

	ResourcePtr	LabelPtr	Beginn	Dauer
	R_Harvester	Labels.Harv_Label	300	30
	R_Forwarder	Labels.Forw_Label	600	30
▶			0	0

Abbildung 39: Das Schichtmodell inkl. Pausen

5.3 Allgemeine Übersicht über das Modell

5.3.1 Zeitarten

Zu Beginn dieses Kapitels sollen noch kurz die einzelnen, im weiteren Textverlauf häufig auftretenden Zeitarten nach LÖFFLER (1990) definiert werden (s. Abbildung 40).

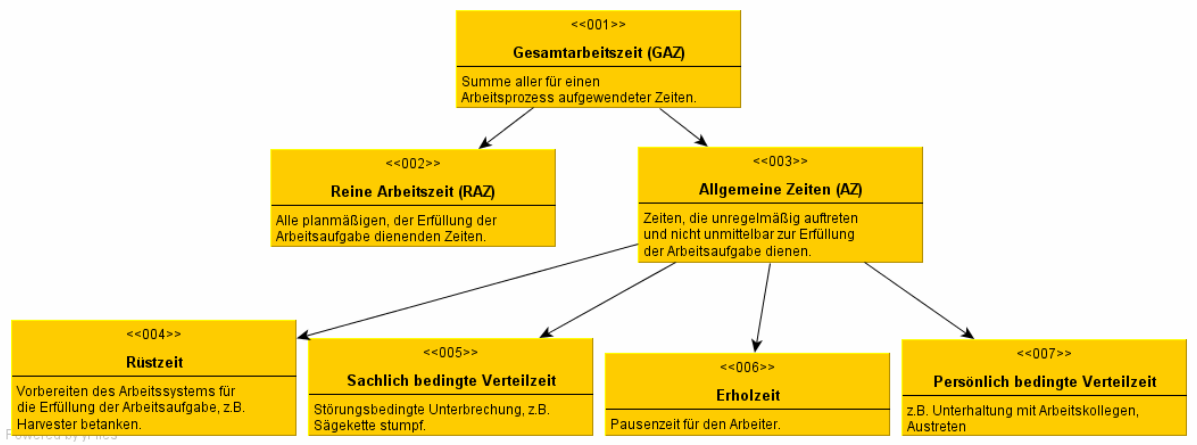


Abbildung 40: Definition der unterschiedlichen Zeitarten

001: Die Summe aller auftretenden Zeitarten wird **Gesamtarbeitszeit (GAZ)** genannt.

002: Alle Zeiten, die bei der direkten Erfüllung einer Arbeitsaufgabe anfallen, werden als **Reine Arbeitszeiten (RAZ)** bezeichnet. Diese Zeiten sind durch so genannte **Maschinenarbeitsstunden (MAS)** definiert. Sie enthalten neben den Zeiten für bestimmte Tätigkeiten auch Pausenzeiten, die eine Dauer von 15 Minuten nicht überschreiten (MAS15).

003: Alle weiteren Pausen- und Unterbrechungszeiten werden als **Allgemeine Zeiten (AZ)** zusammengefasst.

004-007: Dazu gehören neben den **Rüstzeiten** (Vorbereitung der Maschinen und Personen auf den Arbeitseinsatz oder den Ruhezustand nach getaner Arbeit) auch die **sachlich** (z.B. Reparatur einer Maschine) und **persönlich** (Austreten, Zigarettenpause) **bedingten Verteilzeiten** sowie die **Erholzeiten** (z.B. Mittagspausen).

5.3.2 Kurzübersicht

Um die zum Teil bereits erwähnten und im weiteren Verlauf detailliert dargestellten Prozesse in das gesamte Gefüge des Simulationsmodells einordnen zu können, wird an dieser Stelle eine allgemeine Übersicht über das Modell gegeben (s. Abbildung 41).

Abbildung 41: Allgemeine Übersicht über die wesentlichen Bestandteile des Holzerntemodells

001: Als Basis des gesamten Modells fungiert die Simulationssoftware **AutoMod** der Firma Brooks Automation. Sie ist für die Ausführung und Steuerung der einzelnen Prozesse verantwortlich.

002: Wesentlicher Bestandteil der entwickelten Holzerntesimulation sind die **fünf Arbeitssysteme** Harvester, Motormanuelle Holzernte, Forwarder, Schlepper und Pferd. Diese fünf Systeme können in jedwedem Bestandesszenario simuliert werden und decken einen Großteil der heute in der deutschen Forstwirtschaft eingesetzten Arbeitsverfahren ab. Sie werden im Folgenden kurz vorgestellt:

003: Der **Harvester** ist das heute in deutschen Wäldern am häufigsten eingesetzte Holzerntesystem. Er fällt die Bäume von der Rückegasse aus und teilt den Stamm in vordefinierte Abschnitte auf. Dabei legt er diese direkt neben der Rückegasse ab, von wo aus sie später aus dem Bestand an die Waldstraße gerückt werden können.

004: Außer dem Harvester können die Bäume auch durch **Waldarbeiter** mit Hilfe einer Motorsäge gefällt werden. Dieses Arbeitsverfahren wird heute aber überwiegend als Ergänzung des Harvesters, in starkem Laubholz oder in schwer zugänglichen Lagen angewendet, da es im Vergleich zum Harvester eine wesentlich geringere Produktivität aufweist. Die Waldarbeiter fällen den Baum im Bestand und arbeiten ihn vor Ort auf. Vorgeliefert wird normalerweise durch einen Forstspezialschlepper mit Seilwinde, stellenweise aber auch durch den Einsatz spezieller Rückepferde.

005: Liegen die Stammabschnitte nach der Ernte durch den Harvester oder der Vorrückung durch einen Schlepper oder das Pferd an einer Rückegasse, können sie durch den **Forwarder** aufgeladen und zum Polterplatz an der Waldstraße gerückt werden. Der Forwarder kann dabei nur Kurzholz transportieren. Lange Stämme werden mit einem Forstspezialschlepper gerückt.

006: Der **Forstspezialschlepper** kann sowohl für das Vorrücken als auch für das Rücken von Stämmen und Stammabschnitten eingesetzt werden. Unter Einsatz einer Seilwinde ist er in der Lage, die Stämme und Stammabschnitte aus dem Bestand heraus zu ziehen und dann entweder an der Gasse abzulegen oder – teilweise mit Hilfe einer Rückezange – direkt an die Waldstraße zu rücken.

007: Das **Pferd** wird im Normalfall ausschließlich für das Vorrücken von Stammabschnitten verwendet. Es kommt heute vorzugsweise auf nassen und nur unzureichend befahrbaren Böden zum Einsatz, da seine Leistungsfähigkeit in weniger schwer zugänglichen Beständen im Vergleich zu den Systemen Forwarder und Schlepper deutlich geringer ausfällt.

008: Als Simulationsumgebung, in der die fünf erläuterten Arbeitssysteme eingesetzt werden können, ist der **Bestand** anzusehen (s. Kapitel 4.3). Er setzt sich aus einer Bestandesfläche, dem darauf verlaufenden Erschließungssystem sowie den auf der Fläche stehenden Einzelbäumen zusammen.

009: Für diese Einzelbäume hinterliegen Informationen über Baumart, Höhe, BHD, Position, Bezugsrückegasse, Kontrollpunkt, Ablagepunkt, vorgesehene Entnahme und die aus ihnen während der Simulation entstehenden Stämme und Stammabschnitte.

010: Das **Erschließungssystem** (s. Kapitel 4.2) wird auf Basis der Koordinaten von Flächengrenzen, der Start- und Endkoordinaten von Rückegassen, Forststraßen bzw. deren Abschnitten sowie

den im regelmäßigen Abstand von einem Meter platzierten Kontrollpunkten definiert. Hinzu kommen noch dynamisch generierte Ablagepunkte der Stämme und Stammabschnitte.

011: Das **Schichtmodell** (s. Kapitel 5.2) ermöglicht es dem Nutzer, für jedes System eine Startzeit, eine Schichtdauer sowie für die Systeme Harvester und Forwarder zusätzliche Pausenzeiten, angegeben in Minuten, festzulegen und somit eine realtitätsgetreue Simulation durchzuführen.

012: Für die Systeme Harvester und Forwarder können zusätzlich die Startzeit der Arbeitsaufnahme sowie die Dauer und Art einer **Störung** im Arbeitsablauf voreingestellt werden (s. Kapitel 5.2). Diese Unterbrechungen werden dynamisch in die Simulation integriert. Für die anderen drei Arbeitssysteme ist die Definition von Störungen noch nicht möglich, da für sie der jeweilige Zeitaufwand mit Hilfe von speziellen Tarifen berechnet wird, in denen die Störzeiten bereits enthalten sind.

5.3.3 Klassendiagramm

In Abbildung 42 sind in einem Klassendiagramm die akteurspezifischen und die übergeordneten Daten im Zusammenhang dargestellt.

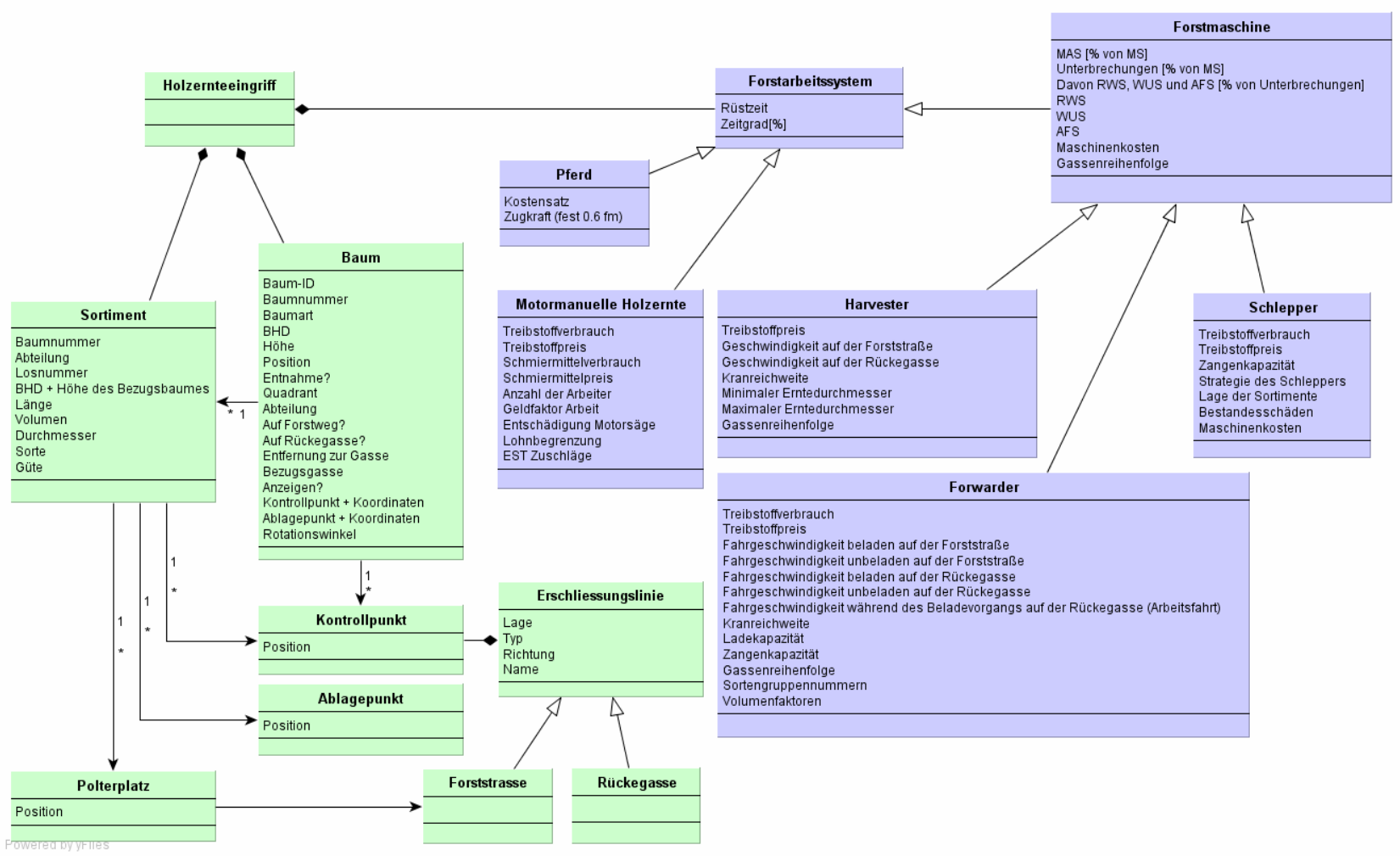


Abbildung 42: Klassendiagramm zur zusammenhängenden Darstellung der akteur-spezifischen und übergeordneten Daten

5.3.4 Detaillierte Übersicht

Zu diesem Kapitel ist anzumerken, dass die Graphik, in der alle einzelnen Prozesse des Modells detailliert dargestellt werden, zu groß ist, um sie als ein Objekt einzufügen. Daher wurde sie aus Gründen der Übersichtlichkeit in vier Abbildungen aufgeteilt (s. Abbildung 43).

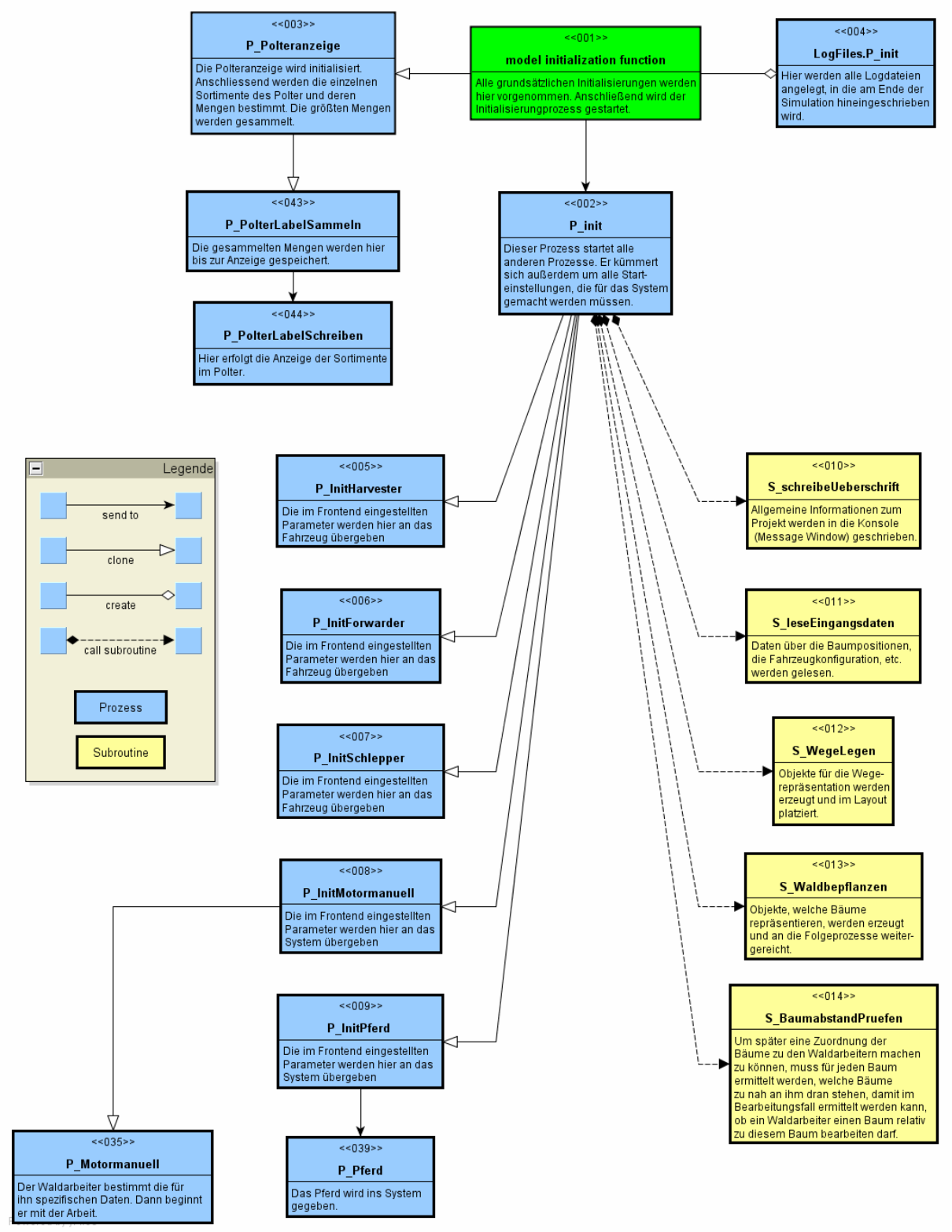


Abbildung 43: Detaillierte Übersicht Teil I

Allerdings kommt es dabei vor, dass die chronologische Nummerierung der Teilprozesse in den einzelnen Abbildungen innerhalb der textlichen Beschreibungen nicht immer aufrechterhalten werden kann. Bestimmte Prozesse erscheinen in den Abbildungen zur besseren Orientierung auch mehrfach.

001: Jeder Simulationslauf beginnt mit der so genannten „model initialization function“. Dies ist der zentrale Einstiegspunkt für die Simulation. Von hier aus werden alle Prozesse gestartet.

002: Der Prozess „P_init“ startet im Anschluss alle anderen Prozesse. Dazu gehört, dass alle Starteinstellungen an die einzelnen Prozesse übergeben werden (s. **005** – **014**).

003: Im Zuge der „model initialization function“ wird auch die Polteranzeige initialisiert. Diese wird in Textform nahe dem Polter angezeigt. Es werden die drei am häufigsten vorkommenden Sortimente in diesem Polter nach Anzahl absteigend sortiert aufgeführt.

004: Dieser Prozess legt sämtliche Logdateien an, in die am Ende jedes Simulationslaufs alle Ergebnisse automatisch hineingeschrieben werden.

005 - 009: Die durch den Benutzer im Frontend eingestellten Parameter werden an dieser Stelle aus Textdateien eingelesen und an die fünf verschiedenen Arbeitssysteme übergeben. Um welche Parameter es sich dabei genau handelt, wird in Kapitel 5.4 näher erläutert.

010: Um eine kurze visuelle Bestätigung des Modellstatus und der aktuellen Versionsnummer zu erhalten, werden diese dem Nutzer in einem so genannten „Message Window“ angezeigt.

011: Alle Parameter der Simulation werden eingelesen.

012: Die als Forststraßen und Rückegassen fungierenden Wegenetzelemente werden in dieser Subroutine erzeugt und im Layout des Modells platziert.

013: Als Bäume definierte Objekte werden hier auf Basis der verschiedenen Parameter erzeugt und an die Folgeprozesse übergeben.

014: Diese Subroutine wurde speziell für eine realistische Simulation der Motormanuellen Holzernte in das Modell integriert. Dabei werden sämtliche Abstände der Bäume zueinander berechnet, damit gewährleistet ist, dass zwei Waldarbeiter nicht ausversehen nebeneinander an zwei Bäumen arbeiten, die nicht weit genug auseinander stehen, um den vorab definierten Sicherheitsabstand von mindestens der doppelten Baumlänge des gerade bearbeiteten Baumes zu garantieren (s. Kapitel 5.6.2). Für die Kalkulation der Arbeitszeiten bei der Motormanuellen Holzernte ist dies allerdings nicht relevant. Es dient vielmehr einer realistischen Arbeitsweise bei der graphischen Darstellung des Prozesses.

035: Im Anschluss an die Initialisierung der Motormanuellen Holzernte (**008**) bestimmt jeder Waldarbeiter die für ihn spezifischen Daten und beginnt dann mit der Arbeit. Dieser Teilprozess musste in das Modell integriert werden, da es hier möglich ist, mehr als eine Arbeitseinheit auszuwählen.

039: Auch das Pferd wird nach der Initialisierung extra in das System überführt. Es wäre theoretisch auch möglich, mehr als ein Pferd einzusetzen.

043: Die Polter sind im graphischen Teil der Simulation mit Anzeigen versehen, auf denen der Nutzer immer den aktuellen Füllstatus der einzelnen Polter ablesen kann. In diesem Prozess werden die aktuellen Holzmengen für die Anzeige gespeichert.

044: An dieser Stelle werden die verschiedenen Holzmengen schließlich angezeigt.

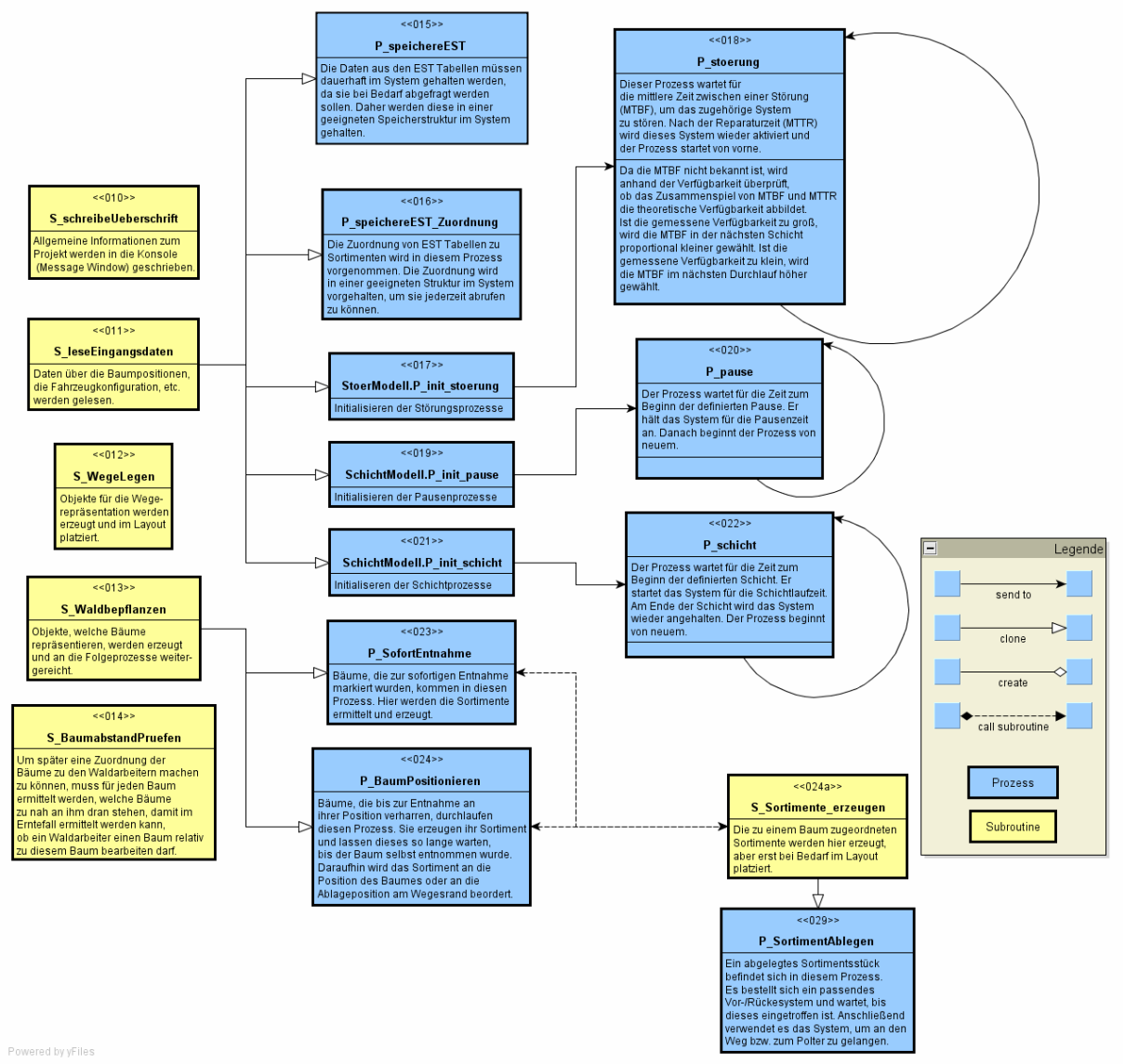


Abbildung 44: Detaillierte Übersicht Teil II

In Abbildung 44 sind zum besseren Verständnis der Gesamtzusammenhänge die Subroutinen 010 bis 014 erneut mit aufgeführt.

015: Im Anschluss an das Einlesen der Eingangsdaten aller Prozesse (**011,** Abbildung 43), werden nun speziell für das Arbeitssystem Motormanuelle Holzernte die Daten der vom Nutzer ausgewählten Tabelle des Erweiterten Sortentarifs (EST) gespeichert, um bei Bedarf abgefragt werden zu können.

016: Jedem einzelnen Sortiment kann durch den Benutzer im Frontend eine EST-Tabelle zugeordnet werden, deren vorgegebene Arbeitszeiten dann angewendet werden. Die Zuordnung wird in diesem Prozess gespeichert und im Hauptspeicher des Systems vorgehalten, um sie jederzeit abrufen zu können.

017: Der hier stattfindenden Initialisierung der Störungsprozesse folgt…

018: …deren Umsetzung, die in Kapitel 5.2 detailliert erklärt wird. Wichtig ist, dass bei der Simulation einer Störung das zuvor im Frontend festgelegte Verhältnis von Gesamtarbeitszeit (GAZ) zu

Maschinenarbeitsstunden (MAS) sowie die Unterteilung in verschiedene Unterbrechungsarten eingehalten werden.

019: Dem Initialisieren der Pausenprozesse folgt…

020: …die Ausführung der Pause während der Simulation. Der Beginn sowie die Dauer der Pause werden ebenfalls durch den Anwender im Frontend des Modells festgelegt (s. Kapitel 5.2).

021: Nach der hier erfolgten Initialisierung der Schichtprozesse…

022: …werden diese im Modell ausgeführt. Die Schichtzeiten beziehen sich auf 24-Stunden-Tage (s. Kapitel 5.2). Ein Schichtzyklus wird nur für Pausen, Störungen oder bei Fertigstellung der simulierten Arbeitsprozesse unterbrochen.

023: In diesem Prozess werden von den in Subroutine **013** erzeugten Bäume diejenigen gespeichert, die als „zu entnehmen“ markiert sind. Für sie werden hier die entsprechenden Sortimente ermittelt.

024: Die zu erntenden Bäume werden auf ihrer Position aufgestellt und verbleiben dort bis zu ihrer Ernte. Im Anschluss daran werden die in Subroutine **026** erzeugten Sortimente je nach Erntemethode entweder an die Position des Baumes (Motormanuelle Ernte) oder an den definierten Ablagepunkt (Harvester) beordert.

024a: Diese Subroutine sorgt dafür, dass für jeden Baum die ihm zugeordneten Sortimente erzeugt und zum entsprechenden Zeitpunkt nach dessen Ernte im System platziert werden.

029: Ein nach der Ernte im Bestand abgelegter Sortimentsabschnitt „bestellt“ sich ein passendes Vor- bzw. Rückesystem und verwendet dieses nach dem Eintreffen, um an den Weg bzw. zum Polter transportiert zu werden.

In Abbildung 45 sind zum besseren Verständnis der Gesamtzusammenhänge die Prozesse 024, 024a und 029 erneut mit aufgeführt.

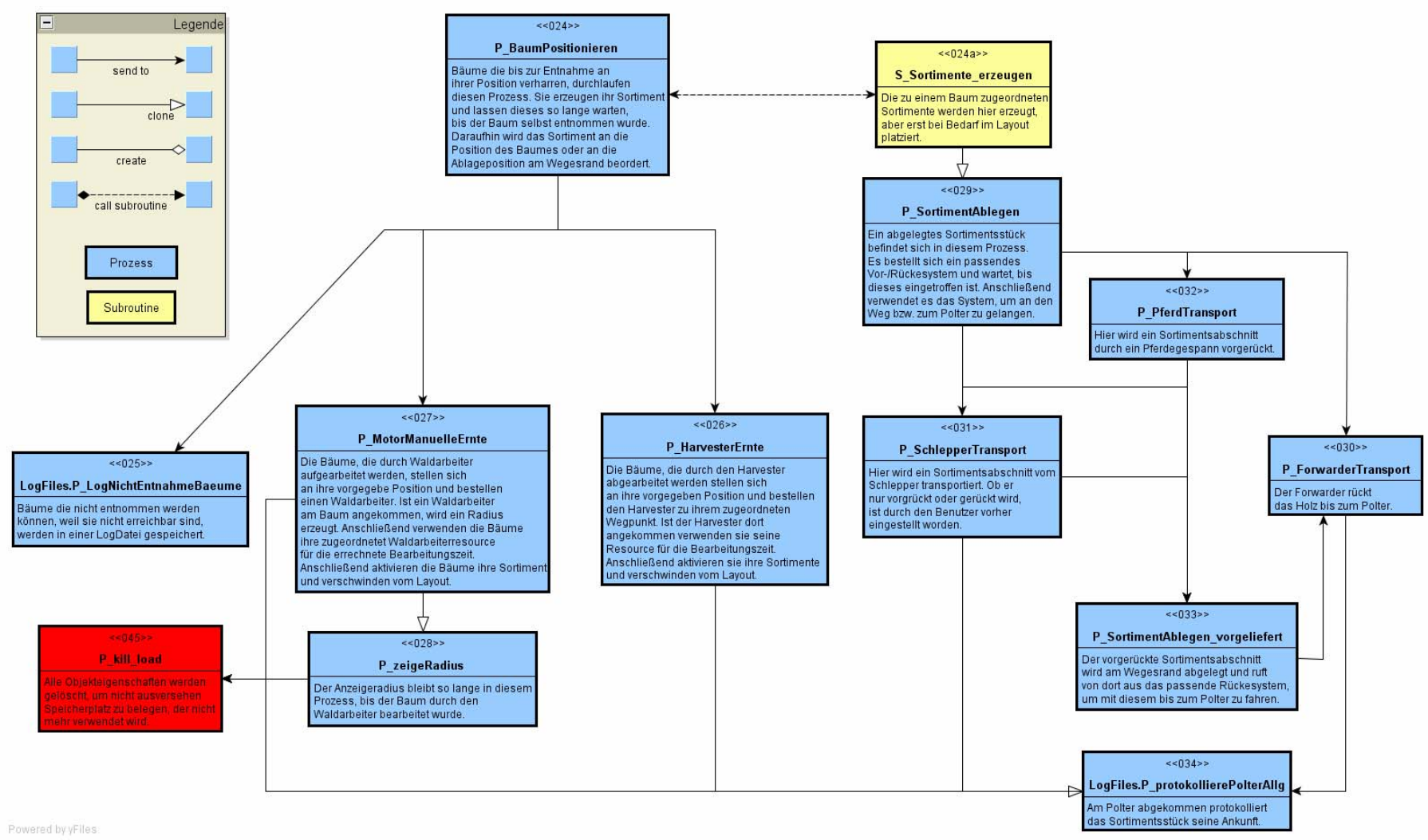


Abbildung 45: Detaillierte Übersicht Teil III

030: Der Transport eines Abschnittes, wie er unter **029** beschrieben ist, wird hier durch den Forwarder ausgeführt. Er transportiert das Holz direkt von der Rückegasse bzw. Forststraße zum Polter.

031: Der Schlepper hat als einziges Arbeitssystem die Fähigkeit, das Holz vom Fällort vor- oder ganz aus dem Bestand heraus zu rücken. Welche Strategie die Maschine in der Simulation tatsächlich umsetzt, bestimmt der Nutzer durch seine Voreinstellung im Frontend.

032: Das Pferd ist ausschließlich in der Lage, Sortimente vom Fällort an die Gasse oder Straße vorzurücken.

033: Durch den Schlepper und das Pferd vorgerückte Abschnitte werden am Rand der Gasse oder Straße abgelegt und „rufen" von dort aus ein passendes Rückesystem, um von diesem bis zum Polter transportiert zu werden. Diese Aufgabe kann dann beispielsweise der Forwarder übernehmen (s. **030**).

034: Hat das Sortimentsstück ein Polter erreicht, wird in diesem Prozess seine Ankunft protokolliert.

024: Die zu erntenden Bäume werden auf ihrer Position aufgestellt und verbleiben dort bis zu ihrer Ernte. Im Anschluss daran werden die in Subroutine **024a** erzeugten Sortimente je nach Erntemethode entweder an die Position des Baumes (Motormanuelle Ernte) oder an den definierten Ablagepunkt (Harvester) beordert.

025: Ausgehend von Prozess **024** werden diejenigen Bäume, die geerntet werden sollen, sich aber außer Reichweite der Maschinen befinden, in einer speziellen Log-Datei gespeichert. Diese Informationen können theoretisch für einen anschließenden Simulationslauf verwendet werden.

026: Dieser Prozess beschreibt die Ernte der Bäume durch den Harvester. Dabei „rufen" die Bäume den Harvester zu sich. Die Maschine hält genau an dem Kontrollpunkt auf der Rückegasse oder Forststraße, der dem entsprechenden Baum zuvor zugeordnet wurde (s. **013**). Von dort aus wird der Baum geerntet, d.h. die Bäume verwenden die Ressource Harvester für die Dauer der Bearbeitung. Anschließend aktivieren sie ihre Sortimente und verschwinden vom Layout.

027: Dieser Prozess beschreibt die Ernte der Bäume durch einen oder mehrere Waldarbeiter. Dabei „rufen" die Bäume einen Waldarbeiter zu sich. Der Arbeiter läuft dann direkt bis zu dem zu erntenden Baum und beginnt mit der Ernte, d.h. die Bäume verwenden die Ressource Waldarbeiter für die Dauer der Bearbeitung. An dieser Stelle wird automatisch ein Kreis mit der doppelten Baumlänge des aktuellen Baumes als Radius erzeugt. Die in Subroutine **014** (s. Abbildung 43) berechneten Abstände der Bäume untereinander werden dann überprüft. Es ist einem zweiten Waldarbeiter, der in diesem Bestand arbeitet nun nicht möglich, einen Baum zu ernten, der sich innerhalb des Sicherheitsradius des ersten Waldarbeiters befindet. Der zweite Arbeiter wird automatisch zu einem weiteren Erntebaum außerhalb des Anzeigeradius gehen. Nach der Ernte aktivieren die Bäume ihre Sortimente und verschwinden vom Layout.

028: Der Anzeigeradius bleibt so lange in diesem Prozess, bis der Baum durch den Waldarbeiter geerntet wurde. Dann verschwindet er automatisch.

045: Alle Objekte, die sich im System befanden, werden vor dem Löschen noch einmal initialisiert, um sicher zu gehen, dass keine „Überreste“ im Hauptspeicher zurückbleiben und die Simulation dadurch gebremst wird.

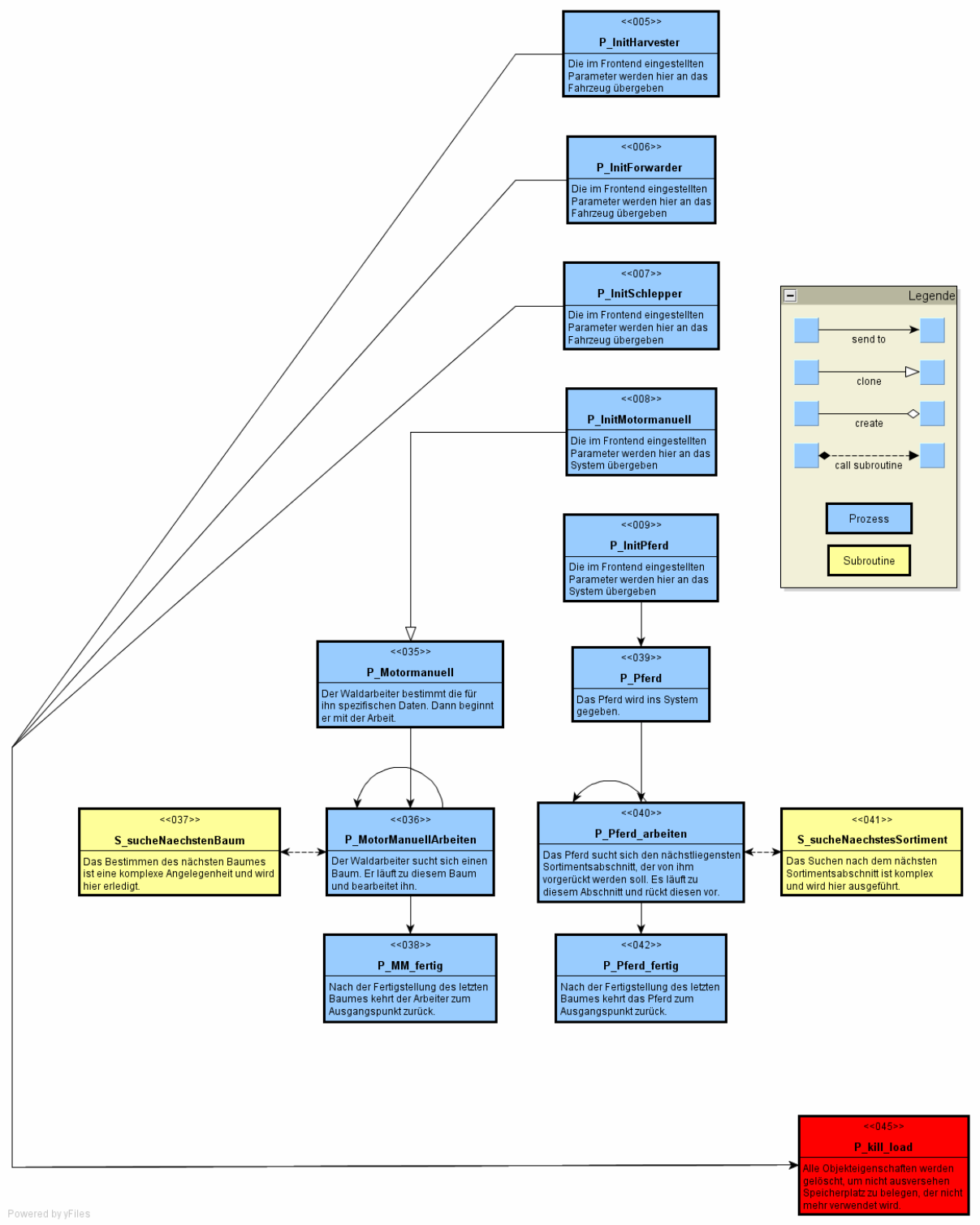


Abbildung 46: Detaillierte Übersicht Teil IV

In Abbildung 46 sind zum besseren Verständnis der Gesamtzusammenhänge die Prozesse 005 bis 009, 035, 039 und 045 erneut mit aufgeführt.

036: Der Waldarbeiter wählt sich den nächstliegensten Baum aus (siehe Subroutine **037**). Hat er ihn gefunden, läuft er zu diesem hin und bearbeitet ihn. Anschließend sucht er den nächsten Baum.

037: Der Waldarbeiter sucht sich den in Luftlinie nächsten Baum heraus, indem er die Abstände von seiner Position zu allen noch zu erntenden Bäumen vergleicht. Der Baum mit dem geringsten Abstand zu ihm wird dann als nächster Arbeitsplatz ausgewählt. Bevor die Distanzüberprüfung stattfindet, wird untersucht, ob dieser Baum überhaupt bearbeitet werden darf, da sich eventuell ein anderer Waldarbeiter an einem Baum befinden kann, der innerhalb des Sicherheitsradius liegt. Ist dies der Fall, kommt dieser Baum nicht in die Auswahl der am nächsten liegenden Bäume.

038: Hat ein Waldarbeiter einen Baum fertig aufgearbeitet und sind keine weiteren Bäume mehr für die Ernte vorgesehen, beendet er seine Arbeit und kehrt zum Ausgangspunkt zurück.

039: Das Pferd-Objekt platziert sich im Layout.

040: Das Pferd wird immer zum nächstliegenden Abschnitt „gerufen“, läuft zu diesem hin und rückt ihn vor.

041: In dieser Subroutine wird das Bestimmen des nächsten zu rückenden Abschnittes ausgeführt. Dabei wird, ähnlich wie bei den Waldarbeitern, die aktuelle Position im Verhältnis zu allen Sortimentsabschnitten betrachtet. Der Sortimentsabschnitt, der in Luftlinie am nächsten liegt, wird gewählt.

042: Hat das Pferd einen Abschnitt vorgerückt und sind keine weiteren Abschnitte mehr für eine Vorrückung vorgesehen, beendet es seine Arbeit und kehrt zum Ausgangspunkt zurück.

045: Alle Objekte, die sich im System befunden haben, werden vor dem Löschen noch einmal initialisiert, um sicher zu gehen, dass keine „Überreste“ im Hauptspeicher zurückbleiben und die Simulation dadurch gebremst wird.

5.4 Der Datenfluss

Abbildung 47 zeigt den ersten Teil der allgemeinen Übersicht über den Datenfluss innerhalb des Modells.

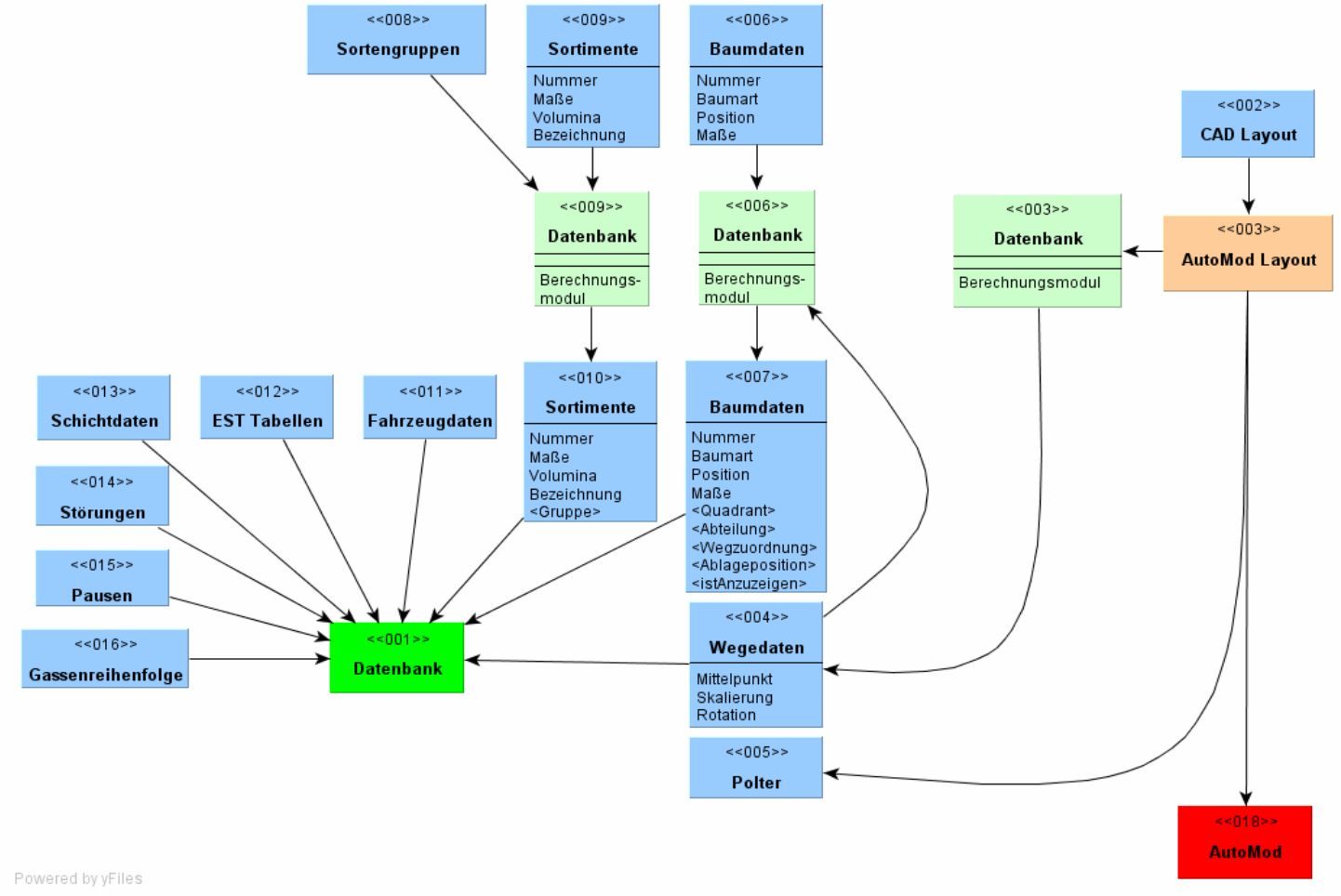


Abbildung 47: Datenfluss Teil I

001: Zentrales Element der Holzerntesimulation ist die Datenbank. Sie enthält alle benötigten Informationen über den Bestand und die Arbeitssysteme. Im aktuellen Modell des Testbestandes wird die Software MS Access zur Verwaltung dieser Daten eingesetzt, sicherlich ist aber auch ein anderes Produkt (z.B. MySQL oder Oracle) für diese Aufgabe geeignet. Dafür müssten allerdings aufwendige Eingabedialoge entwickelt werden, welche unter MS Access leicht zu erstellen sind. Die Informationen werden aus der Datenbank in Textdateien ausgelesen (s. **017**), die dann wiederum in das Modell integriert werden.

002: Die Koordinaten der Bestandesfläche und der Rückegassen und Forststraßen bzw. deren Abschnitte können in einem CAD-Programm gezeichnet oder aus einem GIS ausgelesen werden.

003: Nach erfolgter Umrechnung der Koordinaten auf ein lokales, modellinternes Koordinatensystem und Transformation in das entsprechende Format der Simulationssoftware AutoMod werden die Daten in das Modell eingelesen (s. Kapitel 4.2). Im Berechnungsmodul der Software finden dann im Zuge der Layouterzeugung die Berechnungen der benötigten Wegedaten statt.

004: Die Visualisierung der Wege erfolgt in der Simulation durch zusätzliche Wegeobjekte. Um diese im Layout platzieren zu können, müssen die Koordinaten des Mittelpunktes der Strecke, sowie die ihrer Lage in der Fläche (Rotation) ermittelt werden. Mit diesen Daten können die Wegeobjekte dann passend im Layout platziert werden.

005: Zusammen mit den Berechnungen des Layouts der Bestandesfläche und des Wegenetzes werden auch die Polterplätze im Modell positioniert. Nach vorheriger Absprache mit dem zuständigen Revierleiter können die Koordinaten für die Polter im CAD bzw. aus dem GIS ermittelt werden. An den Polterplätzen werden dann während der Simulation die Stämme und Stammabschnitte durch den Forwarder und Schlepper „abgelegt“.

006: Die in SILVA erzeugten Baumdaten (Baumnummer, Baumart, Position, BHD und Höhe) werden nun im Berechnungsmodul der Software mit den Wegedaten verknüpft.

007: Dabei werden mit Hilfe von Abfragen die Quadranten über die Bestandesfläche verteilt, die Einzelbäume den Abteilungen zugeordnet, jedem Baum eine Rückegasse oder Forststraße bzw. ein entsprechender Kontroll- und Ablagepunkt zugeordnet sowie festgelegt, ob der Baum in der graphischen Darstellung angezeigt wird oder nicht. Liegt der Baum nämlich außerhalb der Bestandesfläche, weil „sein“ Quadrant diese an bestimmten Stellen gezwungenermaßen verlässt, wird dieser Baum automatisch nicht angezeigt.

008: Bezüglich der in HOLZERNTE auf Basis der SILVA-Daten berechneten Sortimente, kann im Frontend des Modells festgelegt werden, ob diese sortenrein, also alle Sorten einzeln oder auch zusammengefasst durch den Forwarder gerückt werden sollen (s. Kapitel 5.6.3). Dazu kann der Nutzer die einzelnen Sortimentstypen in so genannte „Sortengruppen“ einteilen. Diese Information wird zusammen mit den Sortimentsdaten im Berechnungsmodul der Software zusammengeführt.

009: Die Sortimentsinformationen, die in HOLZERNTE berechnet werden, bestehen aus einer Nummer für jeden Abschnitt, den individuellen Maßen (Länge und Mittendurchmesser), dem Volumen und der Bezeichnung der Sortengruppe, zu der dieser Abschnitt gehört. Diese Daten

werden im Berechnungsmodul der Software mit den Angaben über die Sortengruppen verknüpft.

010: In der zentralen Datenbank werden diese Informationen dann abgelegt. Neu hinzu gekommen sind zum einen die Baumnummer, die jedem Sortimentsabschnitt mit Hilfe des Vergleichs der Größen „Höhe“ und „BHD“ zugeordnet wird, zum anderen die Informationen über die Sortengruppen, zu denen die Abschnitte gehören und entsprechend der eingestellten Rückestrategie durch den Forwarder transportiert werden.

011: Als „Fahrzeugdaten“ sind alle Eingabegrößen, die der Nutzer im Frontend zu den fünf Arbeitssystemen gemacht hat, zusammengefasst. Diese Daten werden anschließend in einzelne Textdateien (s. **017**) ausgelesen.

012: Bei der Motormanuellen Holzernte hinterliegt der Erweiterte Sortentarif (EST) als Grundlage zur Berechnung der Dauer bestimmter Holzerntearbeiten. Dieser Tarif besteht aus einer Vielzahl von Tabellen, die komplett in die Datenbank mit aufgenommen werden. Der Nutzer ist im Frontend in der Lage, die für seine Zwecke geeignete Tabelle als Berechnungsgrundlage der Verbrauchszeiten selbst auszuwählen.

013: Vorab eingestellte Schichtzeiten werden ebenfalls in die Datenbank übernommen.

014: Ebenso gelangen die für Störungen eingestellten Werte in die Datenbank, um später im Modell eingesetzt zu werden.

015: Die durch den Nutzer definierten Pausenzeiten werden auch in die Datenbank eingelesen.

016: Für die Arbeitssysteme Harvester und Forwarder müssen vor Beginn der Simulation die genauen Fahrstrecken durch den Nutzer festgelegt werden, damit die Maschinen bei ihren Bewegungen auf Rückegassen und Forststraßen realistische Routen einhalten. Auch diese Informationen werden in der Datenbank abgelegt.

Die zentrale Datenbank kann also als Pool für alle in irgendeiner Form für das Modell relevanten Daten betrachtet werden. In Zukunft könnten in einer solchen Datenbank die Informationen über zahllose Bestandesszenarien inklusive Flächenparametern und Erschließungssystemdaten in Kombinationen mit unterschiedlichsten Arbeitssystemen abgelegt und je nach Bedarf in die Simulationssoftware überführt werden.

017: Sind alle für die Modellierung des Bestandes und der Arbeitssysteme notwendigen Informationen in der Datenbank aggregiert, werden sie während der Kompilierung automatisch in einzelne Textdateien ausgegeben (s. Abbildung 48). Diese Textdateien werden dann für die Simulation eingelesen und ermöglichen somit die Initialisierung und den Ablauf der Simulation.

018: Alle in den verschiedenen Textdateien aufgeführten Daten werden im Verlauf der Modellerzeugung in die Software übertragen. Das Modell ist damit für den ersten Simulationslauf bereit.

Die genauen Erläuterungen zu den einzelnen Textdateien finden sich in Anhang I.

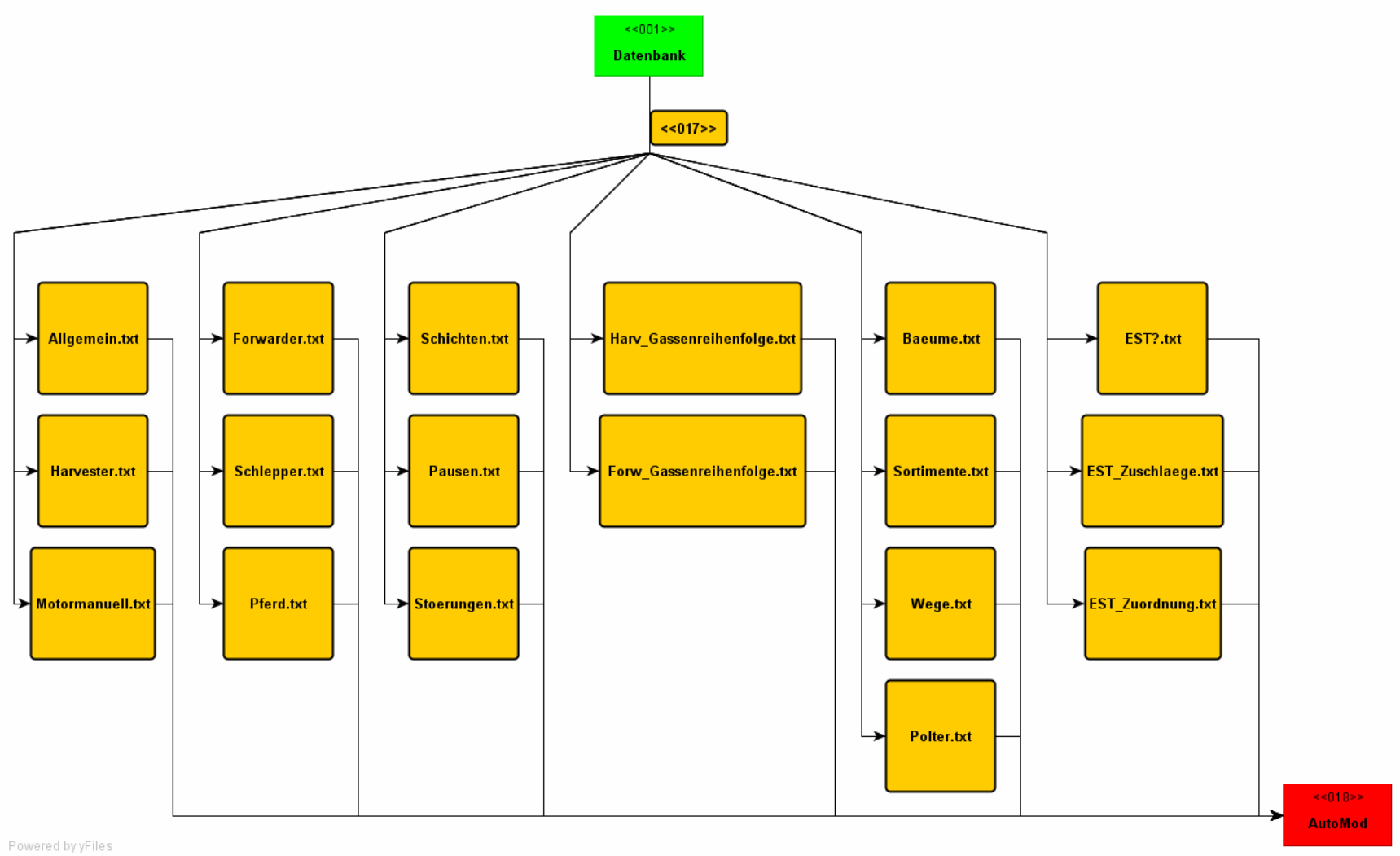


Abbildung 48: Datenfluss Teil II

5.5 Erzeugung des Layouts

In diesem Kapitel werden die einzelnen Prozesse beschrieben, die bei der Erzeugung der Bestandesfläche inklusive Erschließungssystem und des aufstockenden Bestandes im Modell ablaufen (s. Abbildung 49).

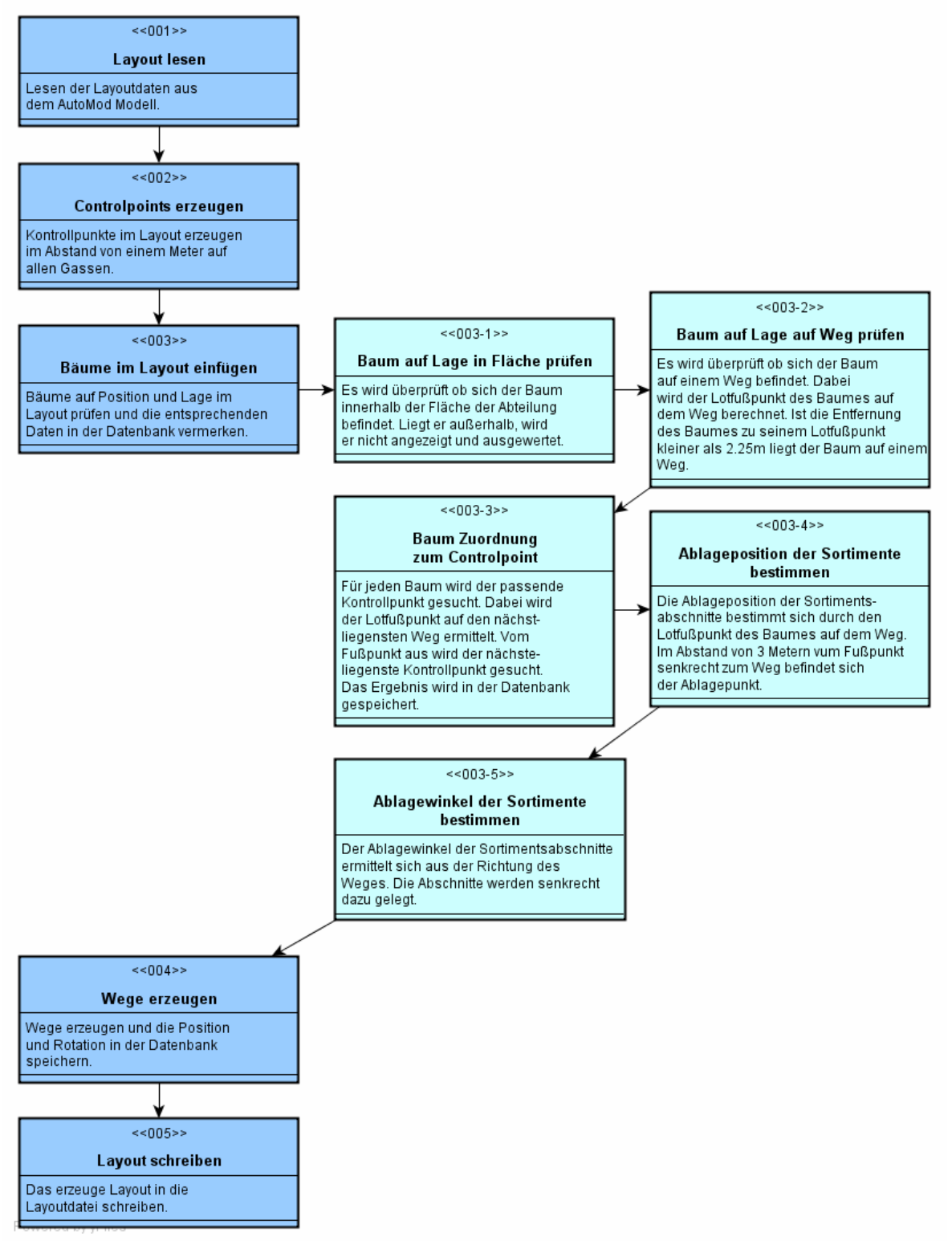


Abbildung 49: Erzeugung des Layouts im Modell

001: Zu Beginn der Layouterzeugung werden sämtliche Layoutdaten aus dem AutoMod-Modell gelesen. Dazu gehören die Koordinaten der Bestandesfläche, der Forststraßen und Rückegassen bzw. ihrer Segmente.

002: Im festen Abstand von einem Meter werden in der Mitte jeder Forststraße und Rückegasse Kontrollpunkte erzeugt (s. Kapitel 4.3.3). Sie dienen den Arbeitssystemen Harvester, Forwarder und Schlepper während der Simulation als Haltepunkte und sind gleichzeitig Bezugspunkte bei der automatischen Ablage der Sortimentsabschnitte an den Forststraßen und Rückegassen.

003: Es folgt die Implementierung der Bäume in das Modell. Dieser Vorgang ist in folgende Prozesse unterteilt.

003-1: Zuerst wird überprüft, ob die Bäume sich mit ihrer Position innerhalb der definierten Bestandesfläche befinden. Dies geschieht durch einen Vergleich der Positionskoordinaten mit den Koordinaten der Flächenbegrenzung. Liegt ein Baum außerhalb der Bestandesfläche, wird er weder in der graphischen Darstellung angezeigt, noch in der rechnerischen Auswertung berücksichtigt.

003-2: Als nächstes muss untersucht werden, ob sich der jeweilige Baum mit seiner Position auf einer Forststraße oder Rückegasse befindet. Diese Kontrolle ist notwendig, da im aktuell vorliegenden Modell (vorerst) keine Ersterschließungssituation simuliert werden soll. Dies bedeutet, dass sämtliche Straßen und Gassen im fertigen Layout bereits „frei geschnitten“ sind. Will man eine Ersterschließung simulieren, kann diese Überprüfung manuell vor Beginn der Simulation außer Kraft gesetzt werden.

In der Mitte der ihm zugeordneten Forststraße oder Rückegasse wird der Lotfußpunkt des entsprechenden Baumes berechnet (s. Abbildung 50).

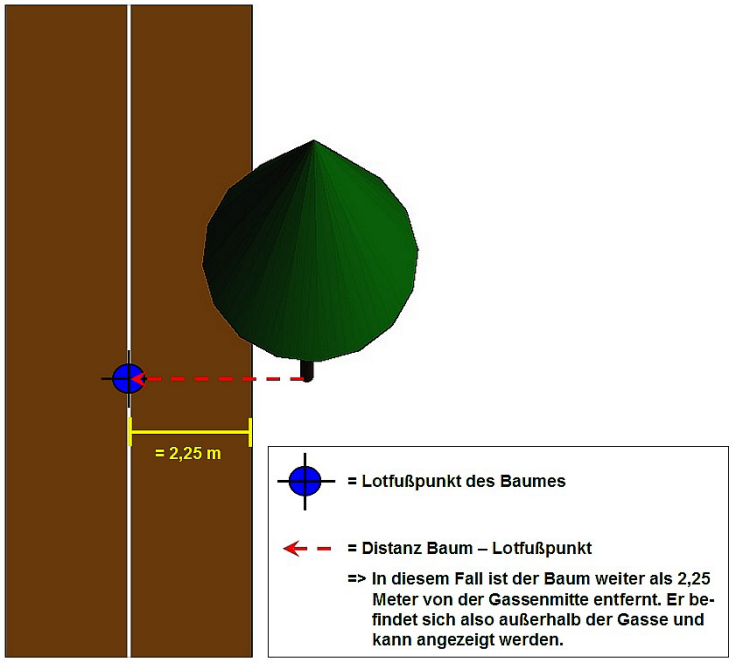


Abbildung 50: Kontrolle der Position eines Baumes mit Hilfe seines Lotfußpunktes

Im Anschluss wird getestet, ob dieser Lotfußpunkt mehr als 2,25 Meter von „seinem“ Baum entfernt ist. Da Forststraßen und Rückegassen immer eine Breite von 4,50 Metern besitzen,

kann somit festgestellt werden, ob sich der Baum auf der Straße bzw. Gasse befindet. Ist die Distanz größer als 2,25 Meter, steht der Baum außerhalb und darf angezeigt werden.

003-3: Ist der Baum als Bestandteil des Modells identifiziert worden, wird ihm ein Kontrollpunkt zugeordnet (s. Kapitel 4.3.3). Dafür wird der Lotfußpunkt auf dem nächstliegenden Weg ermittelt und von diesem ausgehend der nächste Kontrollpunkt gesucht (s. Abbildung 22). Dieser Kontrollpunkt wird dem Baum dann zugeordnet und die genaue Distanz zwischen den beiden ermittelt. Das Ergebnis wird in der Datenbank gespeichert.

003-4: Der Zuordnung des Kontrollpunktes folgt die Definition der Ablagepunkte für die Sortimente (s. Kapitel 4.3.3). Die Ablageposition der Sortimentsabschnitte bestimmt sich durch den Lotfußpunkt des Baumes auf dem Weg. Im Abstand von drei Metern vom Lotfußpunkt senkrecht zum Weg befindet sich der Ablagepunkt (s. Abbildung 23). Die Zuordnung und die Position der Ablagepunkte werden anschließend in der Datenbank gespeichert.

003-5: Zusätzlich wird in diesem Prozess noch dafür gesorgt, dass die Stämme und Stammabschnitte bei der graphischen Darstellung immer senkrecht zur Rückegasse oder Forststraße positioniert werden. Der entsprechende Rotationswinkel wird automatisch berechnet und in die Datenbank übernommen.

004: In diesem Prozess werden die Forststraßen und Rückegassen inklusive Rotationswinkel erzeugt und in der Datenbank gespeichert.

005: Das erzeugte Layout wird abschließend in die Layoutdatei, die vom Simulator lesbar ist, geschrieben. Die Simulation der Holzernte durch die im Folgenden näher beschriebenen Arbeitssysteme kann nun beginnen.

5.6 Die Arbeitssysteme

Insgesamt können innerhalb des hier beschriebenen Modells fünf einzelne Arbeitssysteme und fünf Systemkombinationen simuliert werden. Diese sind zur besseren Übersicht in Tabelle 2 bzw. in Tabelle 3 aufgeführt.

Tabelle 2: Die fünf Arbeitssysteme des Holzerntemodells

	Arbeitsprozesse		
	Holzernte	**Vorrücken**	**Rücken**
Verfahren	Harvester	Harvester (Kranreichweite)	Forwarder
	Motormanuelle Holzernte	Forstspezialschlepper mit Seilwinde und Rückezange	Forstspezialschlepper mit Seilwinde und Rückezange
		Pferd	

Tabelle 3: Auswählbare Kombinationen der Arbeitssysteme (X = wählbar)

Harvester	Motormanuell	Forwarder	Schlepper	Pferd	Holzernte	Rückung
X		X			Der Harvester erntet alle für ihn erreichbaren Bäume.	Der Forwarder rückt alle Stammabschnitte.
X	X	X			Der Harvester erntet alle für ihn erreichbaren Bäume. Die Waldarbeiter bearbeiten alle Bäume, die für den Harvester nicht erreichbar sind.	Der Forwarder rückt alle Stammabschnitte.
X			X		Der Harvester erntet alle für ihn erreichbaren Bäume.	Der Schlepper rückt alle Stammabschnitte.
	X		X		Die Waldarbeiter erntet alle Bäume.	Der Schlepper rückt alle Stammabschnitte.
	X			X	Die Waldarbeiter erntet alle Bäume.	Das Pferd rückt alle Stammabschnitte vor.
X					Der Harvester erntet alle für ihn erreichbaren Bäume.	-
	X				Die Waldarbeiter ernten alle Bäume.	-
		X			-	Der Forwarder rückt alle Stammabschnitte.
			X		-	Der Schlepper rückt alle Stammabschnitte.
				X	-	Das Pferd rückt alle Stammabschnitte vor.

Im Folgenden werden nun die Funktionsweisen der einzelnen Systeme genauer erläutert. Dabei werden allgemeine Informationen, wichtige Systemparameter, die eigentliche Arbeitsweise (Logik), zur Berechnung der Arbeitszeit notwendige Produktivitätsformeln oder Tarife, die zu kalkulierenden Zielgrößen und Bilder der graphischen Darstellung im aktuellen Modell vorgestellt.

5.6.1 Der Harvester

Mit Harvester bezeichnet man einen so genannten Vollernter, der in der maschinellen Holzernte die Fällung, Entastung und Sortimentsbildung durchführt. Seit den frühen 90er Jahren werden diese Maschinen für die Holzernte eingesetzt. Der Vorteil dieses Arbeitssystems liegt besonders in seiner hohen Produktivität, die – verglichen mit der Leistung eines Waldarbeiters – im Regelfall eine höhere Rentabilität besitzt. Haupteinsatzgebiet sind in den meisten Fällen Bestände mit mittelstarkem bis starken Fichtenholz (nach WARKOTSCH, 1999).

5.6.1.1 Benutzeroberfläche und einstellbare Parameter

Die Definition der Maschinenparameter ist in diesem Modell in einem speziell entwickelten Frontend möglich (s. Abbildung 51).

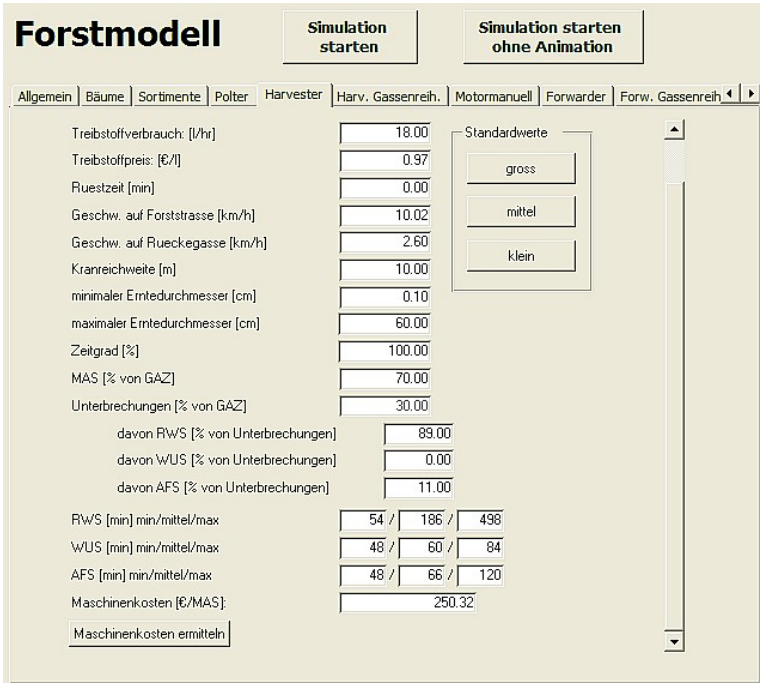


Abbildung 51: Menü des Arbeitssystems Harvester zur Einstellung der verschiedenen Parameter

Die hier veränderbaren Größen sind entscheidend für das Ergebnis jedes Simulationslaufes. Beim System „Harvester“ handelt es sich dabei um folgende Größen:

Tabelle 4: Erläuterungen zu den einstellbaren Systemparametern des Systems Harvester

Parameter	Wert [Einheit]	Bemerkungen	Quelle
Treibstoffverbrauch	18.00 [l/hr]	Der Verbrauch kann je nach Maschinentyp variieren.	FELDKÖTTER, 2004
Treibstoffpreis	[€/l]	Frei wählbarer Wert	
Ruestzeit	[Min]	Frei wählbarer Wert. Die Rüstzeit dient der Vorbereitung der Maschine vor dem eigentlichen Arbeitsbeginn.	
Geschwindigkeit auf der Forststraße	10.0 [km/h]	Dabei handelt es sich um einen Durchschnittswert.	KWF, 1995
Geschwindigkeit auf der Rückegasse	2.6 [km/h]	Fahrgeschwindigkeit während der Holzernte (beinhaltet auch die „Arbeitsfahrt“). Dabei handelt es sich um einen Durchschnittswert.	POHL, 2006
Kranreichweite	10 [m]	Entspricht dem maximalen Abstand vom jeweiligen Haltepunkt auf der Mitte der Rückegasse zum Stammfußpunkt des zu entnehmenden Baumes.	FELDKÖTTER, 2004
Minimaler Erntedurchmesser	[cm]	Ermöglicht die Simulation unterschiedlicher Aggregattypen.	
Maximaler Erntedurchmesser	[cm]	Ermöglicht die Simulation unterschiedlicher Aggregattypen.	
Zeitgrad [%]	[%]	Frei wählbar; dient der Simulation unterschiedlicher Fahrerleistungen.	
MAS [% von MS]	[%]	Frei wählbar; beschreibt den Anteil produktiver Maschinenarbeitsstunden [MAS] an der Gesamtarbeitszeit [GAZ]. Dient der Simulation unterschiedlicher Störungsanfälligkeiten.	
Unterbrechungen [% von MS]	[%]	Anteil der Unterbrechungen an der Gesamtarbeitszeit (GAZ). Dieser Wert errechnet sich automatisch nach Voreinstellung der „MAS [% von MS]“.	
Davon RWS, WUS und AFS [% von Unterbrechungen]	[%]	Anteile der drei Unterbrechungstypen an der gesamten Unterbrechungsdauer (hier wieder 100 %).	
RWS	Minimum 54 [Min/Schicht] Most likely 186 [Min/Schicht] Maximum 498 [Min/Schicht]	RWS (Reparatur- und Wartungsstunden), es wird eine Dreiecksfunktion (beschrieben durch einen wahrscheinlichsten, einen minimalen und einen maximalen Wert) hinterlegt.	FELDKÖTTER, 2004
WUS	Minimum 48 [Min/Schicht] Most likely 60 [Min/Schicht] Maximum 84[Min/Schicht]	WUS (Wege- und Umsetzstunden, reiner Umsetzvorgang), Zusatzoption für den Nutzer, es wird eine Dreiecksfunktion (beschrieben durch einen wahrscheinlichsten, einen minimalen und einen maximalen Wert) hinterlegt.	FELDKÖTTER, 2004
AFS	Minimum 48 [Min/Schicht] Most likely 66 [Min/Schicht] Maximum 120 [Min/Schicht]	AFS (Sonstige Ausfallstunden, nicht tariflich festgelegt; gehen nicht in MAS, RWS, WUS ein; z.B. Warten auf Förster, im Schlamm festgefahren), Es wird eine Dreiecksfunktion (beschrieben durch einen wahrscheinlichsten, einen minimalen und einen maximalen Wert) hinterlegt.	FELDKÖTTER, 2004
Maschinenkosten	[€/MAS]	Kostensatz, der sich entweder pauschal festlegen oder über eine spezielle „Maschinenkostenkalkulation“ extra berechnen lässt.	

Alle in Tabelle 4 aufgeführten Systemparameter sind durch den Nutzer der Holzerntesimulation frei einstellbar. Bezüglich der Maschinenkosten ist es zusätzlich möglich, mit Hilfe einer Maschinenkostenkalkulation den Stundensatz der Maschine in € pro MAS genau zu berechnen (s. Abbildung 52). Die Kalkulation entspricht dem definierten Schema des Kuratoriums für Waldarbeit und Forsttechnik (KWF).

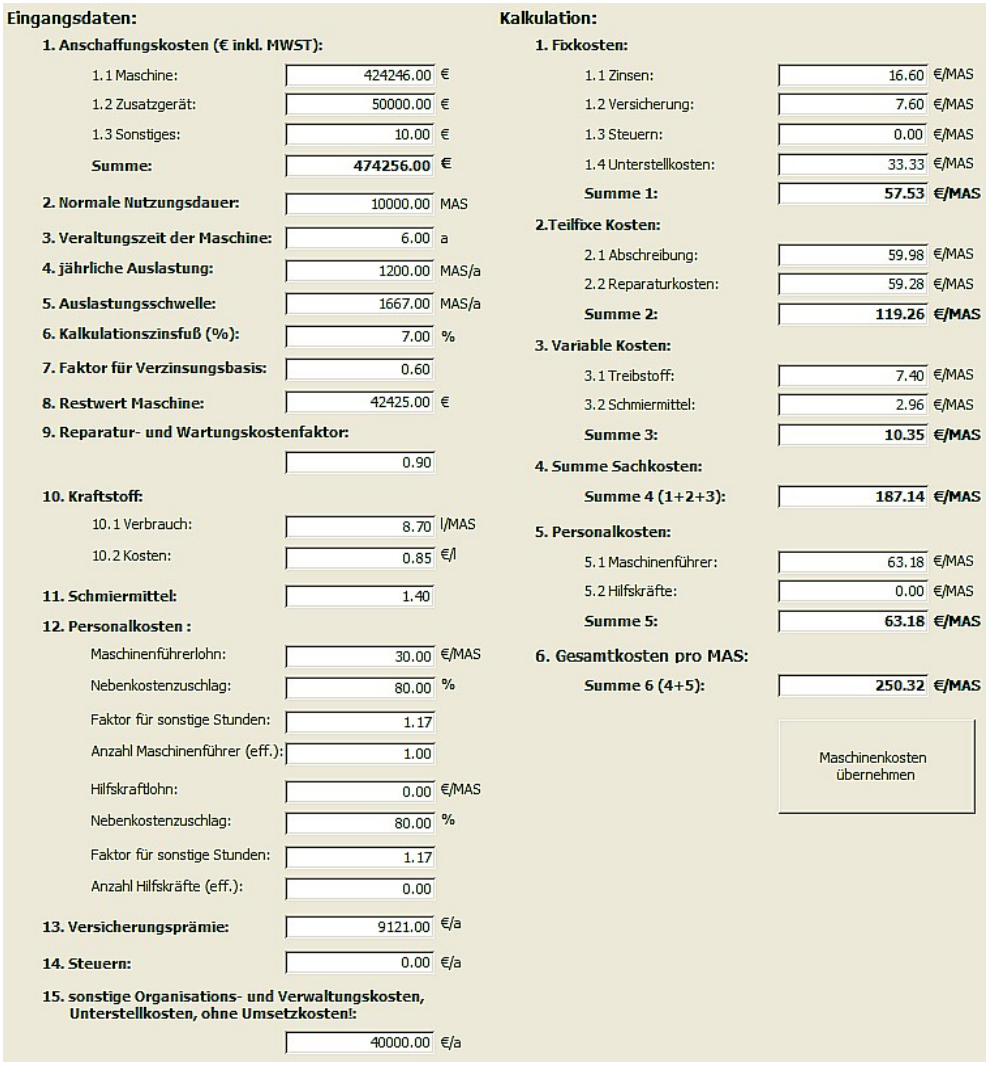


Abbildung 52: Maschinenkostenkalkulation

5.6.1.2 Aufbau und Einsatz der Kalkulationsformeln

Die Voreinstellungen der einzelnen Größen im Menü des Systems, aber auch die Eigenschaften des Erschließungsnetzes, der zu fällenden Bäume und deren Sortimente stellen Attribute dar, die das Ergebnis einer Harvester-Simulation entscheidend beeinflussen. Um diese Effekte möglichst realitätsgetreu abzubilden, entwickelte PAUSCH (2004) spezielle, dem Modell hinterliegende Formeln für die Berechnung der einzelnen Größen (s. Tabelle 5). Dadurch ist es möglich, für die Teilarbeitsschritte „Positionieren des Aggregats“, „Fällschnitt“, „Fällen und Vorliefern“, „Vorschub“ und „Trennschnitt“ in Abhängigkeit der individuellen Eigenschaften jedes Sortimentsabschnitts Einzelzeiten zu berechnen, die im Anschluss addiert und im Endergebnis präsentiert werden. Auf diese Weise wird ein sehr hoch auflösender Detailgrad bei der Simulation eines Harvesters erreicht.

Die Formeln wurden auf Basis von umfangreichem Datenmaterial der Firma Timberjack, das aus skandinavischen Langzeitstudien stammt, erstellt. Diese Daten wurden im Wesentlichen in Fichten-, teilweise auch in Kiefernbeständen erhoben, genauere Informationen über die Bestandesstruktur, die Erschließungssituation oder die Leistungsfähigkeit der Maschinenführer konnte Timberjack aber aus firmenpolitischen Gründen nicht nennen. Ebenso wurde es nicht gestattet, die entwickelten Formeln

an Dritte weiterzugeben. Daher werden in Tabelle 5 auch nur die Einflussgrößen für die einzelnen Formeln genannt. Im Laufe der in dieser Arbeit begonnenen Validierungsversuche können zu einem späteren Zeitpunkt erste Aussagen über die Qualität der Formeln bzw. über ihre Anwendbarkeit auf den aktuell simulierten Bestand getroffen werden (s. Kapitel 10). Dazu muss gesagt werden, dass diese Formeln die zurzeit bestmögliche Lösung für die Simulation eines Harvesters darstellen, da sie auf äußerst umfangreichem Datenmaterial basieren, das im Moment an anderer Stelle nicht existiert. Bestenfalls sollten Langzeitstudien dieser Art in Deutschland durchgeführt werden, um zu gewährleisten, dass sich die Formeln tatsächlich auf deutsche bzw. auf mitteleuropäische Bestandesverhältnisse beziehen.

Tabelle 5: Angaben zu den Formeln zur Berechnung der einzelnen Systemparameter

Arbeitsabschnitt	Einflussgrößen	Bemerkungen	Verwendung	Quelle
Positionieren [Sek]	Distanz von der Baumposition bis zur Gassenmitte [m]	Positionieren des Aggregats am Baum	Ist der Harvester am Baum angekommen, wird die hier errechnete Zeit verbraucht.	TIMBERJACK, PAUSCH, 2004
Fällschnitt [Sek]	Kreisfläche [cm^2] des Stammes in 1,3 m Höhe	Kreisfläche [cm^2] = BHD^2 * Pi/4	Anschließend wird diese Zeit, einmal pro Baum, verbraucht.	TIMBERJACK, PAUSCH, 2004
Fällen und Vorliefern [Sek]	BHD [cm]	Gemeint ist der BHD des entsprechenden Einzelbaumes	Anschließend wird diese Zeit, einmal pro Baum, verbraucht.	TIMBERJACK, PAUSCH, 2004
Vorschub des Stammes im Aggregat (inkl. Entasten) [Sek]	Länge des Abschnittes [m], Volumen des Sortimentstückes [Efm m.R.]	Wird pro Sortimentsstück berechnet	Für jeden Sortimentsabschnitt des Baumes wird diese Zeit eingerechnet.	TIMBERJACK, PAUSCH, 2004
Trennschnitt [Sek]	Zopfdurchmesser [cm]	Wird pro Sortimentsstück berechnet, Zopfdurchmesser = Mittendurchmesser des Sortimentsstückes [cm] – (Länge Sortimentsstück [m]/2 * 1 [cm/lfm])	Für jeden Sortimentsabschnitt des Baumes wird diese Zeit eingerechnet.	TIMBERJACK, PAUSCH, 2004

Aussagen zur Verwendung der einzelnen Systemparameter bei der Berechnung der gesuchten Zielgrößen im Modell finden sich in Anhang IX.

5.6.1.3 Festlegung der Gassenreihenfolge

Vor Beginn der eigentlichen Simulation ist es notwendig, die Fahrtroute der Maschine, hier bezeichnet als „Gassenreihenfolge“, festzulegen. Bei der Entwicklung des Modells wurde zuerst versucht, die Maschine nach dem Prinzip des nächsten zu fällenden Baumes durch den Bestand fahren zu lassen. Dies führte in der Folge aber zu unkoordiniertem Fahrverhalten und unnötig langen und damit unrealistischen Wegstrecken. Daher wurde das Erschließungssystem komplett in so genannte „Gassenabschnitte“ eingeteilt, die alle mit einer entsprechenden Nummer kodiert sind. Durch Eingabe der nun gewünschten Abfolge dieser Gassenabschnitte ist es möglich, den Harvester exakt die Route

fahren zu lassen, die der Nutzer wünscht. Dieses Vorgehen bringt allerdings einen zusätzlichen zeitlichen Aufwand mit sich, da die Fahrtroute vor Beginn der Simulation noch händisch eingegeben werden muss (s. Abbildung 53). Eine andere Vorgehensweise ist aber im Moment nicht möglich, da sonst die gewünschte Präzision bei der Abbildung der Arbeitsweise des Harvesters nicht erreicht werden kann. Die Eingabe erfolgt in eine MS Access-Tabelle, deren Informationen vor Beginn der Simulation automatisch eingelesen werden.

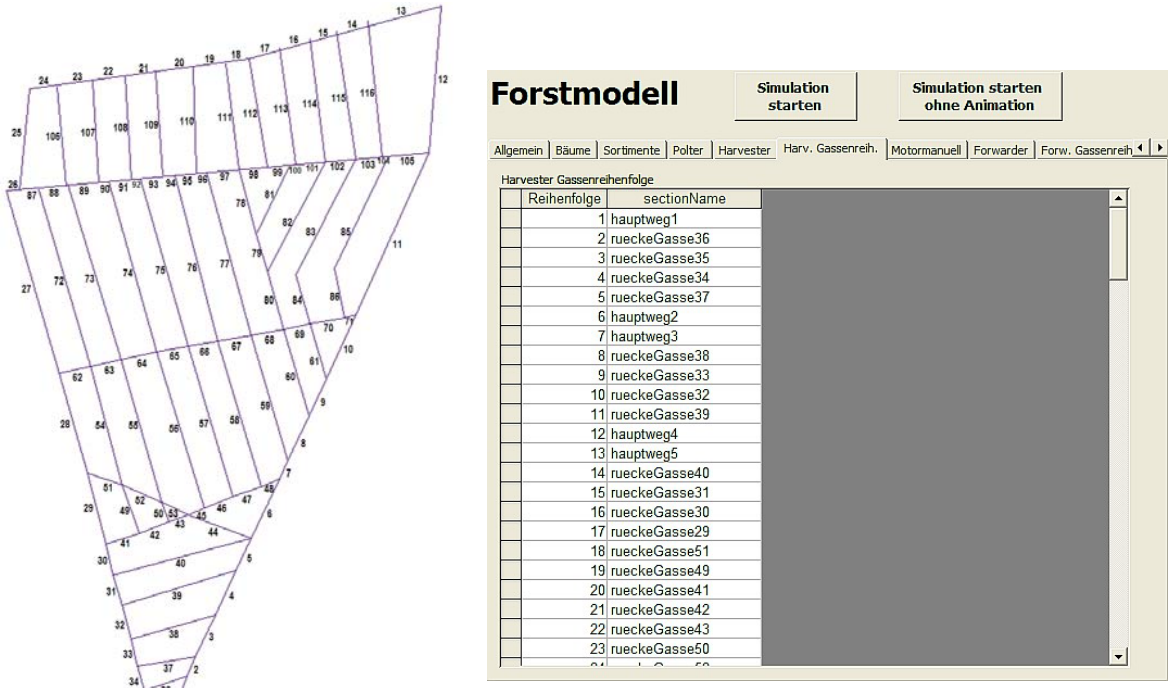


Abbildung 53: In Abschnitte eingeteiltes Erschließungsnetz und Eingabe der Gassenreihenfolge für den Harvester im Benutzermenü des Holzerntemodells

Nach Eingabe der entsprechenden Parameter und der Übernahme der Daten als Grundeinstellung für das System Harvester, kann mit der eigentlichen Simulation begonnen werden. Dabei wurden folgende Abläufe für die systemspezifischen Prozesse entwickelt und modelliert (s. Abbildung 54).

5.6.1.4 Systemlogik und Ablaufdiagramm

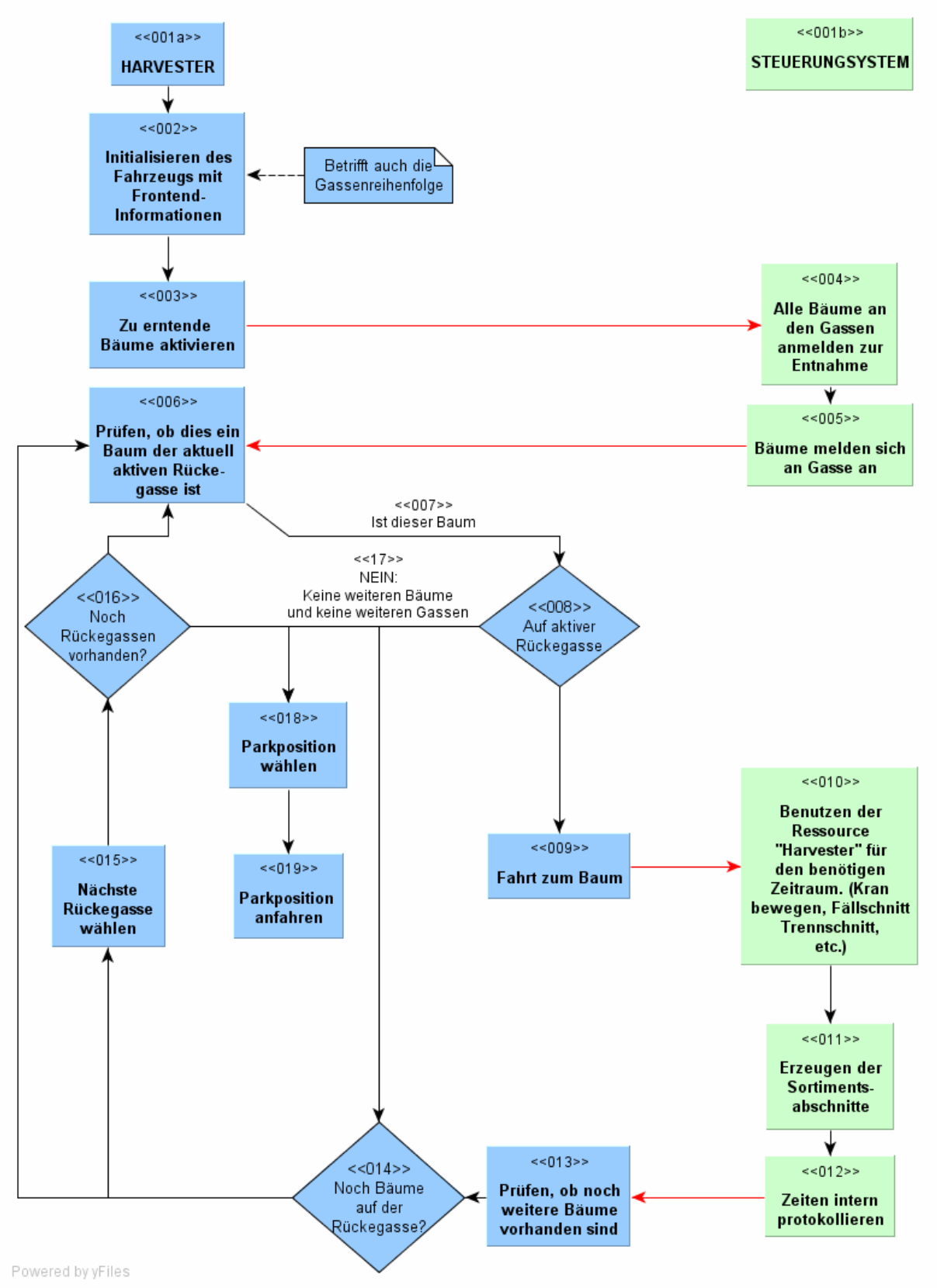


Abbildung 54: Ablaufdiagramm für das Arbeitssystem Harvester

001a + 001b: In AutoMod arbeiten bei der Simulation eines Holzernteeingriffs zwei unterschiedliche Systeme. Zum einen das Maschinensystem Harvester, das sämtliche Aktionen der Maschine selbst ausführt, zum anderen ein zusätzliches Steuerungssystem, welches die Interaktionen der Maschine mit dem zu bearbeitenden Bestand koordiniert.

002: Zuerst beginnt das Maschinensystem mit der Initialisierung, d.h. es werden sämtliche Voreinstellungen für den Harvester aus dem Benutzermenü übernommen. Dazu gehören auch die Gassenreihenfolge sowie Informationen über Schichtdauer und Unterbrechungen.

003: Im Anschluss aktiviert das Maschinensystem alle zu erntenden Bäume und ruft damit automatisch das externe Steuerungssystem auf.

004: Dieses sorgt nun dafür, dass sich alle Erntebäume an den ihnen zugeteilten Forststraßen bzw. Rückegassen „anmelden“. Den einzelnen Bäumen wird schon während der Layouterzeugung nach dem Prinzip der kürzesten Distanz zu einem Kontrollpunkt ein Gassenabschnitt zugeordnet, von dem aus dieser Baum geerntet werden kann (s. Kapitel 4.3.3).

005: Die Bäume selbst „melden“ sich nun an den entsprechenden Forststraßen oder Rückegassen an.

006 + 007 + 008: Der Harvester beginnt auf der in der Gassenreihenfolge an Position eins stehenden Forststraße oder Rückegasse seine Arbeitsfahrt. Dabei überprüft er in der Baumliste des Kollektivs der Entnahmebäume nacheinander jeden einzelnen Baum darauf, ob er seiner aktuell aktivierten Rückegasse zugeordnet ist oder nicht.

009: Ist dies der Fall, begibt er sich auf der Gasse unter Anwendung der jeweiligen Fahrgeschwindigkeit zu dem entsprechenden Baum. Dabei wird seine Parkposition mit einem Kontrollpunkt definiert. Diese Kontrollpunkte werden bereits während der Layouterzeugung automatisch in 1-Meter-Abständen über das Erschließungssystem verteilt. Der Harvester hält dann immer an dem, dem Erntebaum am nächsten liegenden Kontrollpunkt an.

010: Ab hier übernimmt erneut das externe Steuerungssystem, indem es die „Ressource Harvester“ für die zuvor berechnete Aufarbeitungszeit „nutzt“. Diese Zeit wird bereits während der Kompilierung des Modells mit Hilfe der entsprechenden Produktivitätsformeln für das Positionieren des Aggregats und das Fällen und Aufarbeiten anhand der Einzelbaum- und Sortimentsinformationen für jeden einzelnen Baum berechnet.

011: Nach Ablauf der vorgegebenen Arbeitszeit erzeugt das System dann die Sortimente, die aus dem zuvor aufgearbeiteten Baum „entstanden“ sind. Diese Sortimente an der Gasse entstammen den Berechnungen des Programms HOLZERNTE und werden während der Layouterzeugung inklusive ihrer Ablageposition den Erntebäumen zugeordnet. Sie verbleiben dann zum einen nach der Ablage durch den Harvester im Bestand, zum anderen laufen sie in einem anderen Prozess weiter, der später für ihre Abholung durch ein Rückesystem sorgt.

012: Die Zeiten für die komplette Aufarbeitung des Erntebaumes werden intern protokolliert und fließen am Ende der Simulation in das finale Ergebnis ein.

013 + 014: Im Anschluss an die Aufarbeitung überprüft das Maschinensystem, ob noch weitere Bäume auf der zurzeit befahrenen Rückegasse vorhanden sind. Werden zusätzliche Bäume lokalisiert, beginnt der Prozess, wie ab **006** beschrieben, erneut.

015 + 016: Werden keine weiteren Erntebäume auf der Rückegasse „entdeckt“, wählt der Harvester aus der Gassenreihenfolge die nächste zu befahrende Gasse aus bzw. er prüft, ob überhaupt noch weitere Gassen zu befahren sind.

017 + 018 + 019: Befinden sich keine zu erntenden Bäume mehr auf der aktuell durch den Harvester befahrenen Rückegasse oder ist die Maschine am Ende ihrer vorgegebenen Fahrtroute angekommen, wählt sie automatisch ihre im Layout festgelegte Parkposition aus und fährt sie an. Nach Erreichen der Parkposition wird die Simulation beendet.

Die Ergebnisdaten werden in eine Textdatei geschrieben und dann mit Hilfe eines Makros[24] in die dazugehörige Excel-Tabelle überführt.

5.6.1.5 Übersicht über die Eingangs-, Ausgangs- und Zustandsdaten sowie die graphische Umsetzung im Modell

Abbildung 55 zeigt eine Übersicht über alle notwendigen Eingangs-, Ausgangs- und Zustandsdaten des Arbeitssystems sowie einige Bilder der Simulation.

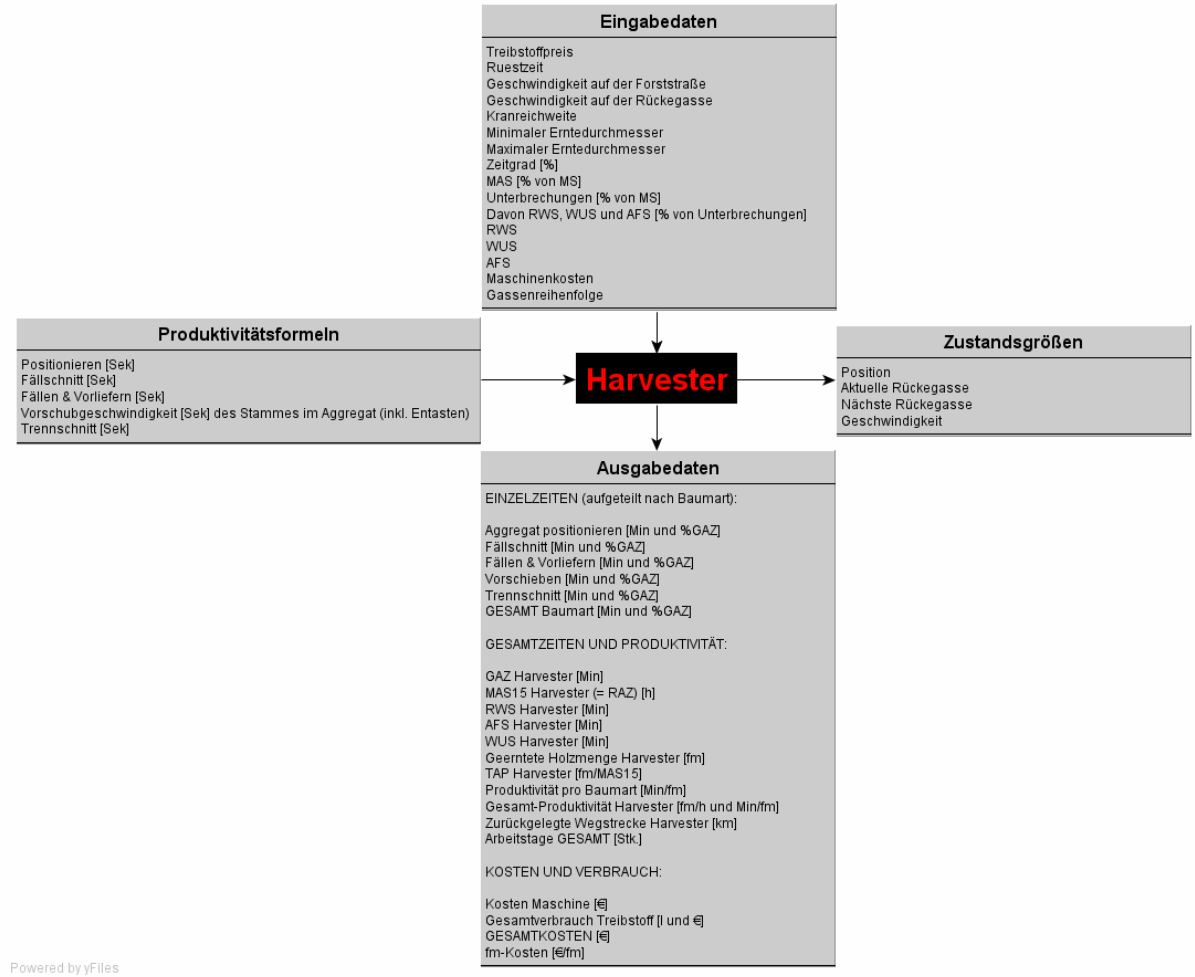


Abbildung 55: Übersicht über die Eingangs-, Ausgangs- und Zustandsdaten des Arbeitssystems Harvester

[24] Ein Makro ist ein kleines Programm oder Skript, das bestimmte Abläufe in einem Anwendungsprogramm automatisiert.

Alle Ergebnisse eines Simulationslaufs werden aus den entsprechenden Textdateien unter Einsatz eines Makros automatisch in ein MS Excel-Frontend überführt. Dort hat der Nutzer dann die Gelegenheit, sich die Ergebnisse im Überblick anzuschauen und ggf. miteinander zu vergleichen.
Bei der graphischen Umsetzung wurde für den Harvester ein 3D-Modell entwickelt, das der Nutzer während der gesamten Simulation in der Bestandesumgebung beobachten kann (s. Abbildung 56).

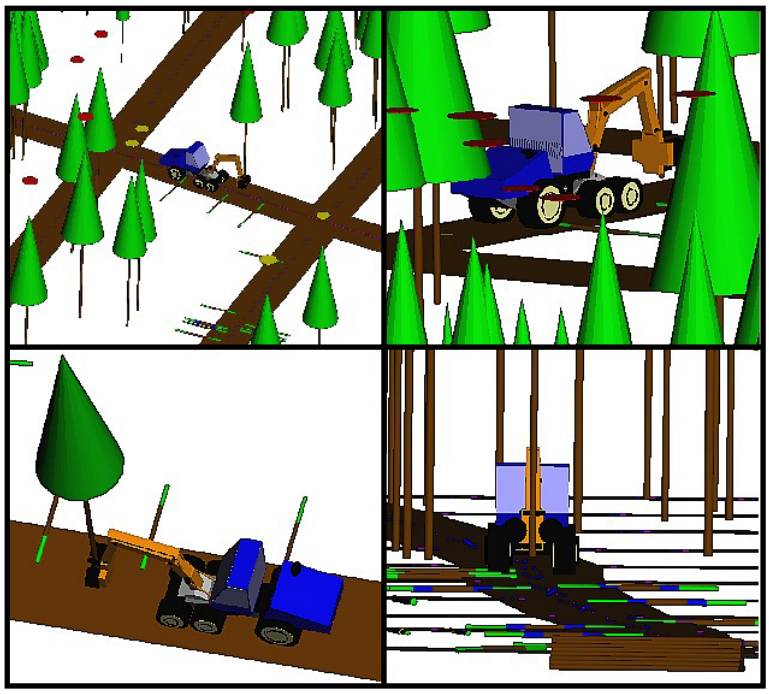


Abbildung 56: Darstellung des Harvesters im Modell

5.6.2 Die Motormanuelle Holzernte

Als Motormanuelle Holzernte wird das Fällen und Aufarbeiten von Bäumen durch Waldarbeiter, so genannte Forstwirte, bezeichnet. Die Arbeiter fällen einen Baum, entasten ihn und teilen ihn durch Trennschnitte in die gewünschten Sortimente auf. Charakteristisch für diese Arbeitsweise ist das unmittelbare Aufarbeiten der Erntebäume im Bestand. Die Stämme und Stammabschnitte müssen dann in einem späteren Prozess mit Hilfe eines Schleppers oder Pferdes an die nächstgelegene Straße oder Gasse vorgerückt werden, von wo aus sie dann bis zum Polter transportiert werden können. Bis Anfang der 90er Jahre war diese Form der Holzgewinnung am weitesten verbreitet. Erst mit Einführung der Vollernter wurde die Holzernte auf diese neue Arbeitsmethode umgestellt. Die hohe Leistungsfähigkeit des Harvesters in Durchforstungsbeständen, die meist komplett aus Nadelholz bestehen, hat dazu geführt, dass die Maschinen überwiegend in diesen Arbeitsbereichen eingesetzt werden. Die Forstwirte arbeiten heute vermehrt in Laub- und stärkeren Nadelholzbeständen.

5.6.2.1 Benutzeroberfläche und einstellbare Parameter

Die hier dargestellte Vorgehensweise zur Berechnung von Kosten- und Leistungswerten im Zuge der Simulation bezieht den Erweiterten Sortentarif (EST) für die Waldarbeit, welcher im Staatsforst zur Entlohnung eingesetzt wurde bzw. stellenweise noch eingesetzt wird, in das Modell mit ein (vgl. TARIFVERTRAG, 2000).

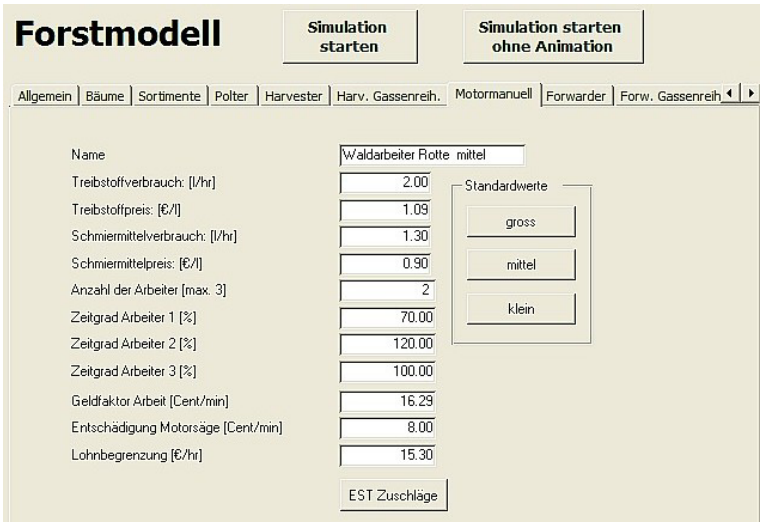


Abbildung 57: Menü des Arbeitssystems Motormanuelle Holzernte zur Einstellung der verschiedenen Parameter

Durch Auswahl des Menüs „Motormanuell“ erhält der Nutzer einen Überblick über die verschiedenen Parameter, die er selbst für dieses Arbeitssystem einstellen kann (s. Abbildung 57). Dazu gehören Treibstoff- und Schmiermittelverbrauch sowie die entsprechenden Kosten pro Liter. Des Weiteren sehen spezielle Eingabefelder die Einstellung des Zeitgrades und die Anzahl der entsprechenden

Arbeiter vor. Es können bis zu drei Waldarbeiter gleichzeitig simuliert werden, für die ein individuell gültiger Zeitgrad einstellbar ist. Dieser Wert dient dann vor Beginn der Simulation als Faktor zur Umrechnung der entsprechenden Gesamtarbeitszeit (GAZ) pro Sortimentsabschnitt. Zusätzlich können Lohnfaktoren für Arbeit und Motorsäge sowie eine Lohnbegrenzungsschwelle festgelegt werden. Die einzelnen Parameter werden in Tabelle 6 näher erläutert.

Tabelle 6: Erläuterungen zu den einstellbaren Systemparametern des Systems Motormanuelle Holzernte

Parameter	Wert [Einheit]	Bemerkungen
Treibstoffverbrauch	[l/hr]	Frei wählbarer Wert
Treibstoffpreis	[€/l]	Frei wählbarer Wert
Schmiermittelverbrauch	[l/hr]	Frei wählbarer Wert
Schmiermittelpreis	[€/l]	Frei wählbarer Wert
Anzahl der Arbeiter	[Stk.]	Es können maximal drei Waldarbeiter gleichzeitig simuliert werden.
Zeitgrad Arbeiter 1-3	[%]	Für jeden der drei Waldarbeiter kann ein eigener Zeitgrad definiert werden.
Geldfaktor Arbeit	[Cent/Min]	Dieser Faktor wird später zur Lohnermittlung auf die berechnete Vorgabezeit (GAZ) der einzelnen Arbeiter angewendet.
Entschädigung Motorsäge	[Cent/Min]	Dieser Faktor wird später zur Lohnermittlung auf die berechnete Vorgabezeit (GAZ) der einzelnen Motorsägen angewendet.
Lohnbegrenzung	[€/hr]	Dieser Wert ermöglicht es, eine feste Lohnobergrenze zu definieren, die trotz größerer Arbeitsleistung einzelner Arbeiter nicht überschritten werden kann. Diese Vorgehensweise ist bei der Verlohnung nach EST vorgesehen, um „Akkordarbeiten“ zu verhindern.

Im Menü „Sortimente“ (s. Abbildung 58), das der Nutzer über das Startmenü erreichen kann, wird ihm automatisch angezeigt, wie viele Lose innerhalb des anstehenden Hiebes anfallen werden. Diese Informationen entstammen der MS Access-Tabelle des ausscheidenden Bestandes, die mit Hilfe der Kalkulationssoftware HOLZERNTE erstellt worden ist. Die genauen Beschreibungen der einzelnen Sortimente müssen allerdings noch manuell durch den Benutzer eingegeben werden, da HOLZERNTE diese Definitionen nicht präzise genug ausgibt.

Hat der Benutzer nun einen Überblick, über die Baumart(en) sowie die, in entsprechende Lose aufgeteilten Sortimente, besteht für ihn die Möglichkeit, jedem Sortiment eine Tabelle aus dem EST zuzuordnen, deren Zeitangaben dann entsprechend zur Berechnung der Einzelzeiten herangezogen werden. Die Zuordnung geschieht durch Eingabe der Nummer der entsprechenden Tabelle nach der Klassifizierung des EST. Im rechten unteren Fenster dieses Menüs wird dem Nutzer außerdem angezeigt, welche Baumarten bei diesem Hieb zur Ernte anstehen. Diese Information erleichtert ihm die Auswahl der EST-Tabellen, deren Produktivitätszahlen jeweils nur für bestimmte Baumarten gelten.

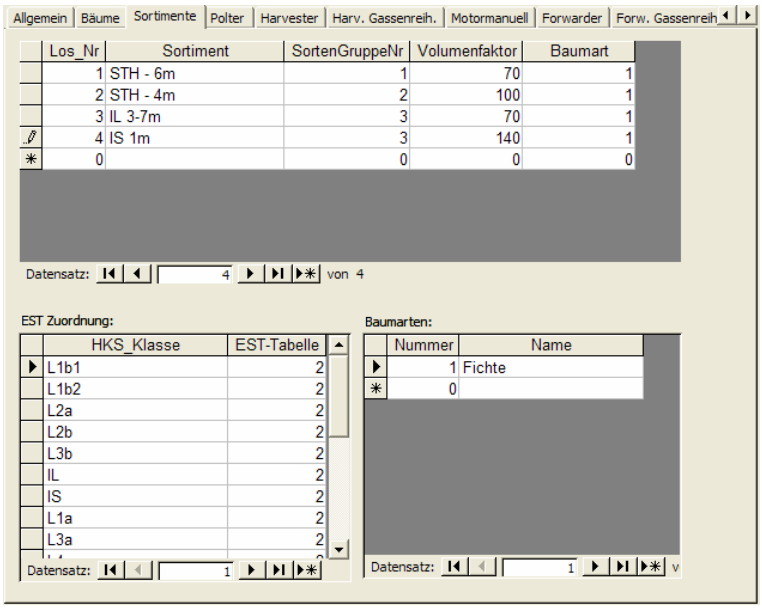


Abbildung 58: Übersicht über Lose, Sortimente und Zuordnung zur entsprechenden EST-Tabelle

5.6.2.2 Ermittlung der Tabellen-Vorgabezeit (GAZ) pro Stammabschnitt für Arbeiter und Motorsäge auf Grundlage des Erweiterten Sortentarifs (EST)

Immer dann, wenn in der Simulation ein Stammabschnitt motormanuell aufgearbeitet werden soll, ermittelt das Modell durch die im Folgenden erläuterten Formeln und Tabellen die Bearbeitungszeit dieses Sortimentsstückes. Diese Zeiten und weiteren Angaben werden dann aufsummiert und am Ende der Simulation in eine Ergebnisdatei geschrieben.

Um zu verdeutlichen, wie die Berechnung der Tabellen-Vorgabezeit (ohne Zuschläge) im Modell funktioniert, soll dies mit Hilfe von Tabelle 2 des EST (s. Tabelle 7) erläutert werden.

Tabelle 7: Auszug aus Tabelle 2 des EST

	Mittendurchmesser o.R.		Arbeits- und Motorsägenzeiten in Min/Fm o.R.	
Sorte	**Dm1**	**Dm2**	**Fi_Arb**	**Fi_MS**
L0	8	8	202	92
L0	9	9	149	65
L1a	10	10	111	50
L1a	11	12	80	38
L1a	13	14	53	29
L1b	15	16	43	23
L1b	17	19	37	18
L2a	20	24	30	14
L2b	**25**	**29**	**25**	**11**
L3a	30	34	22	9
L3b	35	39	19	8
L4	40	49	15	6
L5	50	59	13	5
L6	60	1000	12	4

In diesem Beispiel geht es um eine Fichte mit einem BHD von 36,1 cm und einer Höhe von 20,7 m (s. Tabelle 8). Aus dieser Fichte werden insgesamt drei Stammteile gewonnen. Das erste Stammteil ist ein sechs Meter langes Stück mit einem Mittendurchmesser ohne Rinde von 29,05 cm. Aus Tabelle 2 des EST wird nun ersichtlich, dass dieses Stück in die HKS-Klasse L2b fällt (Mittendurchmesser-Stufe 25-29 cm). Nun lässt sich aus der Tabelle die Arbeiterzeit und die Motorsägenzeit in Minuten für die Aufarbeitung von **einem** Festmeter (!) Fichte dieser Durchmesserstufe ablesen. Im Falle des oben genannten Stammteiles sind dies 25 bzw. 11 Minuten. Das Stammteil besitzt aber nur ein Volumen von 0,4441917 fm mit Rinde, d.h. die Vorgabezeiten müssen entsprechend verringert werden. Durch Multiplikation der Arbeitszeit von 25 Minuten mit dem Volumenwert des Stammteiles erhält man den Zeitbedarf für eben dieses Stammteil, hier 11 Minuten. Die Motorsägenzeit beträgt dementsprechend 5 Minuten. Diese Motorsägenzeit ist keine „Extra-Zeit“. Sie ist schon in der Arbeiterzeit enthalten, wird aber aufgrund der getrennten Verlohnung des Arbeiters und der Auszahlung von Motorsägengeld zusätzlich aufgeführt.

Tabelle 8: Auszug aus der MS Access-Sortimentstabelle des Testbestandes 140 A1, eine Fichte

Los_Nr	Ba	Baum_Nr	HKS[25]_Sorte	HKS_Klasse	HKS_Güte	Anzahl_lang	BHD	Hoehe	Mdm	Laenge	Volumen_mR
1	1	1	STH[26]	L2b[27]	B[28]	1	36,1	20,7	29,05	6	0,4441917
1	1	1	STH	L2a[29]	B	1	36,1	20,7	22,60	6	0,2718586
3	1	1	IL[30]		IN[31]	1	36,1	20,7	15,95	3	0,06877814

Dieses Vorgehen setzt sich dann genauso für die weiteren Stammteile fort. Auf die so errechneten GAZ-Werte müssen dann noch die entsprechend ausgewählten Zuschläge angewendet werden.

[25] HKS = Handelsklassensortierung

[26] STH = Stammholz

[27] Bezeichnung nach Mittenstärkensortierung der HKS für Stammabschnitte mit einem Mittendurchmesser von 25 bis 29 cm

[28] Qualitätsbezeichnung nach Gütesortierung der HKS (Holz von normaler Qualität einschließlich stammtrockenem Holz mit einem oder mehreren der folgenden Fehler: schwache Krümmung und schwacher Drehwuchs, geringe Abholzigkeit, einige gesunde Äste von kleinem oder mittlerem Durchmesser - jedoch nicht grobastig -, eine geringe Anzahl kranker Äste von geringerem Durchmesser, leicht exzentrischer Kern, einige Unregelmäßigkeiten des Umrisses oder einige andere vereinzelte, durch eine gute allgemeine Qualität ausgeglichene Fehler.)

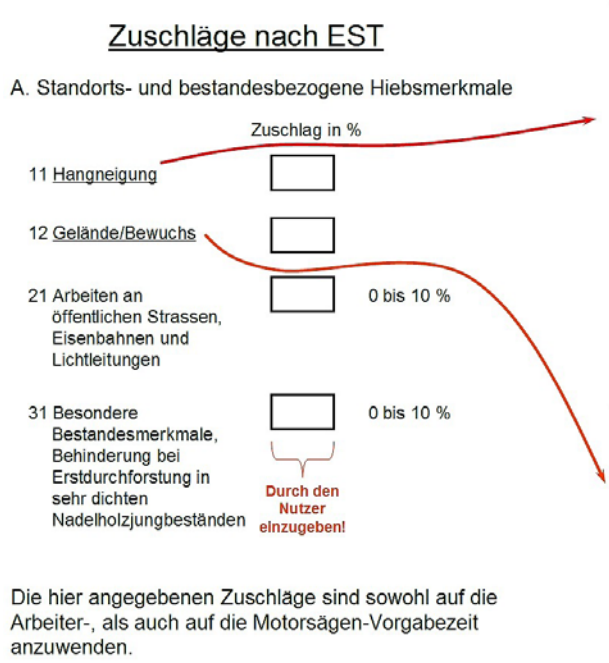
[29] Bezeichnung nach Mittenstärkensortierung der HKS für Stammabschnitte mit einem Mittendurchmesser von 20 bis 24 cm

[30] Industrieholz „lang“

[31] Industrieholz (gesund, nicht grobastig, keine starke Krümmung)

5.6.2.3 Festlegung und Einbeziehung der EST-Zuschläge

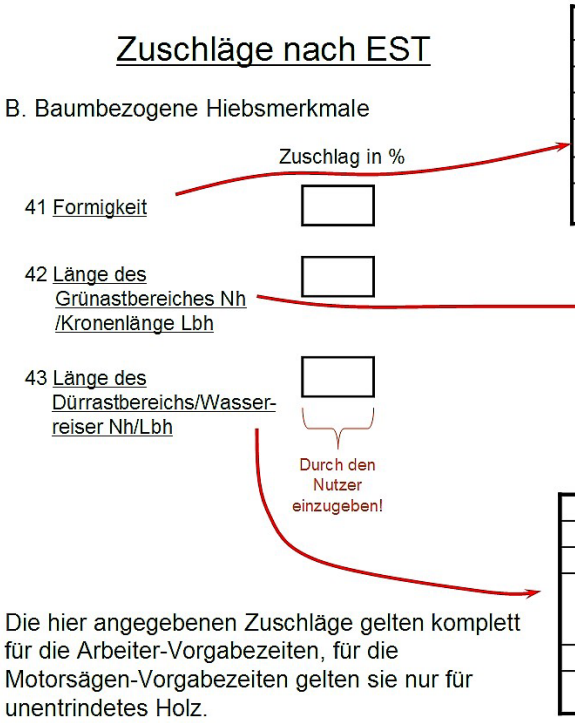
In den Abbildungen 59 bis 61 sind die zur Auswahl stehenden Zuschlagsarten dargestellt.



Nr. Hiebsmerkmal	Stufe	Zuschlag in % ohne Schnee	Zuschlag in % mit Schnee
1	über 1 bis 15 %	0	3
2	über 15 bis 25 %	2	5
3	über 25 bis 35 %	4	8
4	über 35 bis 45 %	7	13
5	über 45 bis 55 %	12	19
6	über 55 bis 65 %	20	30
7	über 65 %	30	

Nr. Hiebsmerkmal	Behinderung	Zuschlag in %
1	keine oder geringe	0
2	mittlere	5
3	starke	10
4	sehr starke	15
5	extrem starke	20
6	Sonderstandorte	15 bis 30

Abbildung 59: Struktur der im EST vorgesehenen Zuschläge (Standorts- und Bestandesbezogene Hiebsmerkmale)



Stufe	Ausprägung		Zuschlag / Abschlag in %		
	Nadelholz	Laubholz	Mittenstärkensortierung		
			Fi/Ta	Kie	Lbh
1	langschäftig		-10	-10	-10
2	mittelschäftig		0	0	0
3	kurzschäftig		11	11	11
4	sehr kurzschäftig		23	23	23

Stufe	Ausprägung		Zuschlag / Abschlag in %		
	Nadelholz	Laubholz	Mittenstärkensortierung		
			Fi/Ta	Kie	Lbh
1	bis 25 %	bis 25 % (kurz)	0	0	0
2	über 25 – 50 %	über 25 – 50 % (normal)	7	7	7
3	über 50 – 75 %	über 50 % (lang)	14	14	14
4	über 75 %		21	21	

Stufe	Ausprägung		Zuschlag / Abschlag in %		
	Nadelholz	Laubholz	Mittenstärkensortierung		
			Fi/Ta	Kie	Lbh
1	bis 25 %	keine oder wenige schwächere	0	0	0
2	über 25 – 50 %	mehrere oder stärkere zahlreiche	3	6	7
3	über 50 %		6	12	14

Abbildung 60: Struktur der im EST vorgesehenen Zuschläge (Baumbezogene Hiebsmerkmale 1)

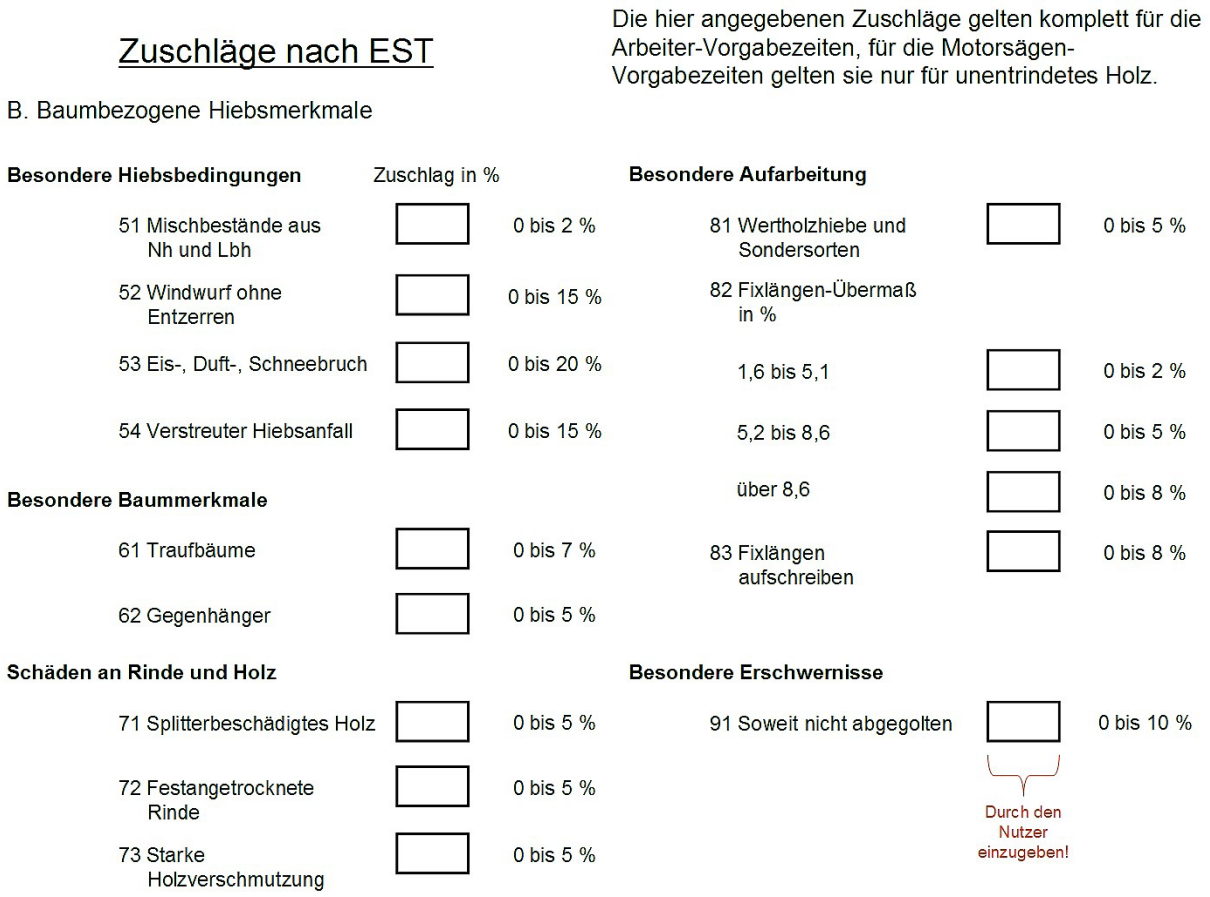
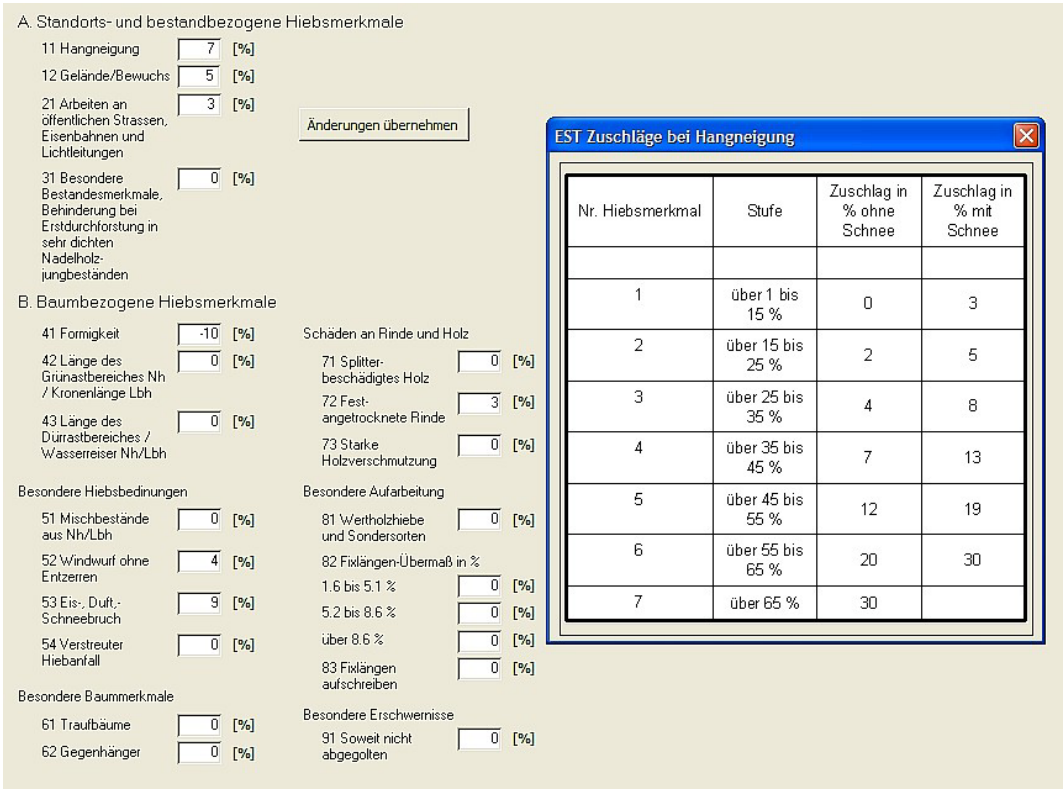


Abbildung 61: Struktur der im EST vorgesehenen Zuschläge (Baumbezogene Hiebsmerkmale 2)

Es ist möglich, für jede Zuschlagsart eine entsprechende Prozentzahl einzusetzen, die dann auf die Vorgabezeit des EST umgerechnet wird. In einigen Fällen wird durch Anklicken des Zuschlagskriteriums ein weiteres Fenster mit den dazugehörigen Tabellen geöffnet, das dem Nutzer die einzelnen Zuschlagsstufen sichtbar macht (s. Abbildung 62).

Die hier ausgewählten %-Werte beziehen sich auf die vorher errechneten Vorgabezeiten (GAZ) für Arbeiter und Motorsäge. Diese Zeiten werden dann entsprechend der %-Werte erweitert.



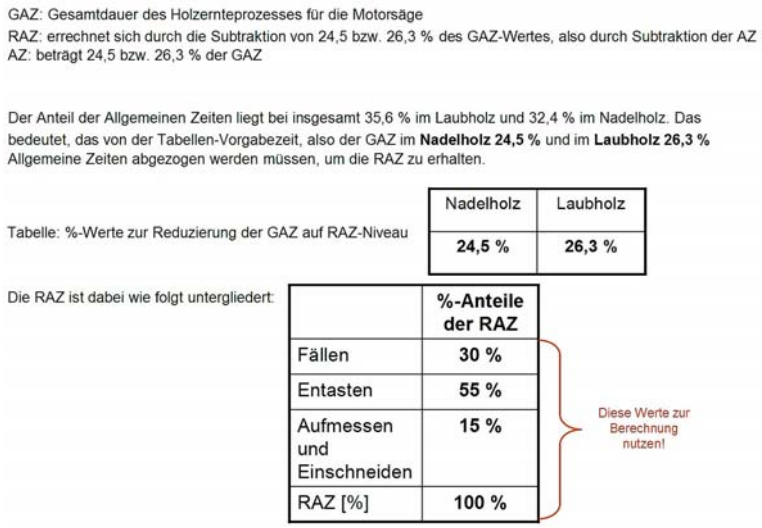
Nr. Hiebsmerkmal	Stufe	Zuschlag in % ohne Schnee	Zuschlag in % mit Schnee
1	über 1 bis 15 %	0	3
2	über 15 bis 25 %	2	5
3	über 25 bis 35 %	4	8
4	über 35 bis 45 %	7	13
5	über 45 bis 55 %	12	19
6	über 55 bis 65 %	20	30
7	über 65 %	30	

Abbildung 62: Einstellung der EST-Zuschläge im Modell

5.6.2.4 Einbeziehung des Zeitgrades

Im Anschluss erhält man die Gesamtarbeitszeit (GAZ) inklusive Zuschläge. Auf diese Zeit muss der entsprechende Zeitgrad angewendet werden. Dieser Zeitgrad ist im Allgemeinen > 100 % und schwankt z.B. bei Holzernte-Stücklohnarbeiten zwischen etwa 130 und 140. Das bedeutet, dass im Durchschnitt der tatsächliche Zeitbedarf nur etwa 60 bis 70 % der Vorgabezeit (GAZ) beträgt. Auf diese Weise ist z.B. der unterschiedliche Ausbildungsstand von Waldarbeitern zu simulieren.

Aufteilung der Gesamtarbeitszeit auf Reine Arbeitszeit und Allgemeine Zeiten



GAZ: Gesamtdauer des Holzernteprozesses für die Motorsäge
RAZ: errechnet sich durch die Subtraktion von 24,5 bzw. 26,3 % des GAZ-Wertes, also durch Subtraktion der AZ
AZ: beträgt 24,5 bzw. 26,3 % der GAZ

Der Anteil der Allgemeinen Zeiten liegt bei insgesamt 35,6 % im Laubholz und 32,4 % im Nadelholz. Das bedeutet, das von der Tabellen-Vorgabezeit, also der GAZ im **Nadelholz 24,5 %** und im **Laubholz 26,3 %** Allgemeine Zeiten abgezogen werden müssen, um die RAZ zu erhalten.

Tabelle: %-Werte zur Reduzierung der GAZ auf RAZ-Niveau

Nadelholz	Laubholz
24,5 %	**26,3 %**

Die RAZ ist dabei wie folgt untergliedert:

	%-Anteile der RAZ
Fällen	**30 %**
Entasten	**55 %**
Aufmessen und Einschneiden	**15 %**
RAZ [%]	**100 %**

Diese Werte zur Berechnung nutzen!

Abbildung 63: %-Werte zur Reduzierung der GAZ auf RAZ-Niveau und Aufteilung der RAZ in die einzelnen Prozess-Abschnitte

Wie in Abbildung 63 aufgezeigt, ist es im nächsten Schritt notwendig, die errechnete GAZ inklusive der Zuschläge auf das Niveau der Reinen Arbeitszeit (RAZ) zu reduzieren, um diesen, für die spätere Auswertung wichtigen Wert zu ermitteln. Die anzuwendenden %-Werte können ebenfalls Abbildung 63 entnommen werden. Es wird zwischen Laub- und Nadelholz unterschieden.
Die erhaltene RAZ soll dann noch in die einzelnen Prozess-Abschnitte „Fällen“, „Entasten“ und „Aufmessen und Einschneiden“ unterteilt werden. Diese Vorgehensweise ist nötig, um im Ergebnisfenster, das am Ende der Simulation erscheint, die entsprechende Dauer jedes einzelnen Arbeitsschrittes darstellen zu können. Weiterhin wird bei der Reduzierung der GAZ auf RAZ-Niveau automatisch die entsprechende Dauer der AZ ermittelt. Dieser Wert soll ebenfalls im Ergebnisfenster aufgeführt werden.
Zusammenfassend noch einmal das Vorgehen zur Ermittlung von GAZ, RAZ und AZ:

1. Berechnung der Tabellen-Vorgabezeit (GAZ) für Arbeiter und Motorsäge für jedes einzelne Sortimentsstück.
2. Hinzufügen der Zuschlagswerte zur GAZ für die entsprechende Erntemaßnahme, d.h. hier wird mit der Summe der GAZ-Werte aller einzelnen Sortimentsabschnitte gearbeitet, die jeder Arbeiter aufgearbeitet hat.
3. Einbeziehung des Zeitgrades für jeden Arbeiter.
4. Aufteilung der GAZ in RAZ und AZ mit Hilfe der entsprechenden %-Werte.

Diese Vorgehensweise führt dazu, dass für alle Bäume des ausscheidenden Bestandes die exakte Aufarbeitungsdauer bekannt ist. Ein Arbeiter, der also einen zu fällenden Baum erreicht, bleibt dann genau für die vorgesehene Dauer an diesem Baum stehen.
Aussagen zur Verwendung der einzelnen Systemparameter bei der Berechnung der gesuchten Zielgrößen im Modell finden sich in Anhang IX.

5.6.2.5 Kostensätze

In Deutschland gilt der EST-Vertrag unter der Maßgabe des Lohntarifvertrages. Die hier aufgeführten Werte sind als Grundlage zur Kostenberechnung ausreichend (s. Tabelle 9).

Tabelle 9: Lohnfaktoren für Motormanuelle Holzernte

Leistung	Wert	Quelle
Geldfaktor Arbeit	16,29 Cent/Min	KWF, 2004 http://www.kwf-online.de/deutsch/mensch/lohn/est/geldfaktoren.htm
Entschädigung Motorsäge	8,00 Cent/Min	KWF, 2004

5.6.2.6 Systemlogik und Ablaufdiagramm

Ziel dieses Modellbestandteiles ist es, die Ernte bestimmter, ausgewählter Bäume durch eine Rotte von Waldarbeitern (in diesem Fall zwei bis drei Personen) darzustellen.
Ausgangspunkt für die Waldarbeiter ist ein vorab definierter „Interaktionspunkt“ im Bestand**.** Die Arbeiter sollen nun die nächstgelegenen, zu fällenden Bäume aufsuchen. Sie arbeiten getrennt, d.h. jeder Arbeiter hat einen eigenen Baum, den er fällen und aufarbeiten muss. Wichtig ist hierbei, dass die Bäume, an denen gearbeitet wird, aus Sicherheitsgründen nicht zu nahe beieinander stehen. Ein bestimmter Mindestabstand ist also nötig. Dieser Mindestabstand ergibt sich laut Unfallverhütungsvorschrift (s. UVV FORSTEN, 1997) aus der doppelten Baumlänge. Bei einem 30 m hohen Baum darf also in einem Radius von 60 m um den Baum herum keine zweite Person arbeiten. An diese Vorgabe hält sich das Modell durch Verdoppelung der jeweiligen Baumhöhe und Bildung eines entsprechenden Sicherheitskreises um den Baum herum. Während der Simulation errechnet AutoMod dynamisch, ob ein Baum zu nahe am nächstgelegenen Arbeiter steht und deshalb aus Sicherheitsgründen noch nicht aufgearbeitet werden kann. Ist dies der Fall, sucht sich der zweite Arbeiter den nächsten zur Fällung markierten Baum aus, überprüft wieder den Abstand zum Arbeitskollegen und beginnt ggf. mit der Ernte oder wartet, bis ein weiterer Erntebaum „frei“ wird.
Die graphische Darstellung der Arbeiter im Bestand wird realitätsnah umgesetzt. Dies bedeutet, dass sich die Arbeiter beim Wechsel von Baum zu Baum frei durch den Bestand bewegen. Allerdings wird die dafür aufgebrachte Laufzeit nicht in die Auswertung übernommen, da Laufzeiten aller Art bereits in den EST-Vorgabezeiten enthalten sind. Im Hintergrund der Simulation ist eine fest definierte Laufgeschwindigkeit von 2,4 km/h für die Waldarbeiter eingestellt (nach PATZAK, 2003), die nicht durch den Nutzer verändert werden kann.
Die Tatsache, dass sich die Waldarbeiter immer nach dem Prinzip des nächsten zu fällenden Baumes durch den Bestand bewegen, kann zu einer etwas unkonventionell erscheinenden Routenwahl führen. Da aber die Laufzeiten nicht extra in die Zeitberechnung der Simulation mit einfließen, sind die zum Teil „überflüssig“ erscheinenden Wege nicht von Bedeutung und treten ausschließlich aufgrund der graphischen Darstellung im Modell auf.
Das Diagramm in Abbildung 64 zeigt den genauen Ablauf der einzelnen Teilarbeitsschritte im Modell.

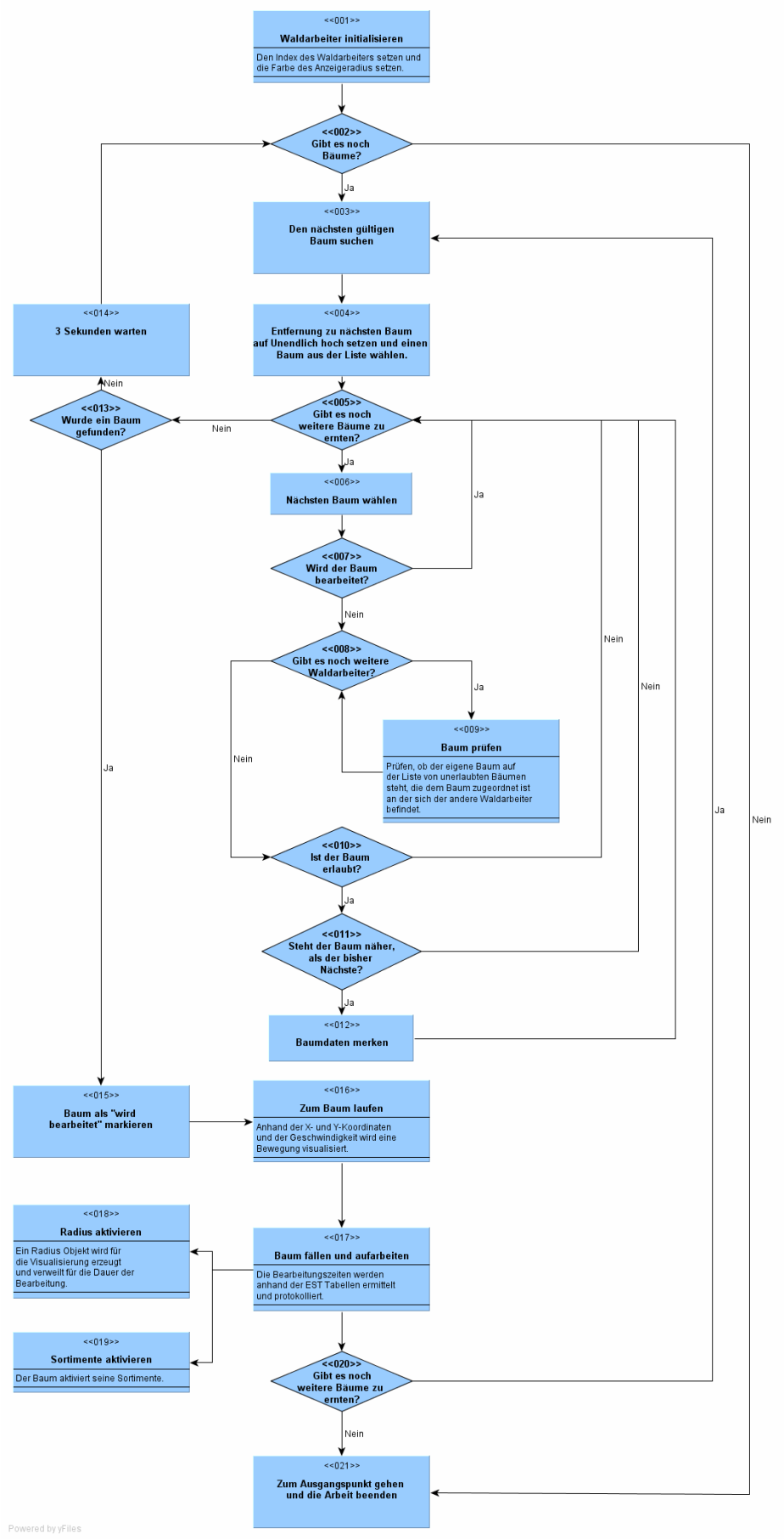


Abbildung 64: Ablaufdiagramm für das Arbeitssystem Motormanuelle Holzernte

001: Die Simulation der Motormanuellen Holzernte beginnt mit der Initialisierung der Waldarbeiter. Dabei werden sowohl der Index des bzw. der Waldarbeiter(s), als auch die Farbe des Sicherheitskreises des Arbeiters, welcher bei der Bearbeitung eines Baumes angezeigt wird, gesetzt.

002: Im nächsten Prozess wird überprüft, ob sich noch weitere, zu erntende Bäume im Bestand befinden.

003: Ist dies der Fall, wird der nächste, zur Ernte anstehende Baum gesucht. Dazu muss der Waldarbeiter alle im Bestand stehenden Erntebäume untersuchen, da er die Zielvorgabe hat, den Baum, der sich als nächster zu seiner aktuellen Position befindet, zuerst aufzuarbeiten. Dieser, sich im Kreislauf wiederholende Prozess ist in die Prozesse **004-012** unterteilt:

004: Zuerst wird die Distanz zwischen dem Waldarbeiter und dem als nächstes von ihm „untersuchten" Baum auf „unendlich" gesetzt. Dadurch wird sichergestellt, dass bei der Überprüfung alle im Bestand befindlichen Bäume mit getestet werden.

005: Er beginnt mit dem ersten Baum der Liste aller zu erntenden Bäume. Hat er diesen auf die direkte Distanz zu ihm hin überprüft, untersucht er, ob es noch weitere Erntebäume in diesem Bestand gibt.

006: Entdeckt er in der Baumliste einen weiteren Erntebaum…

007: …wird überprüft, ob dieser Baum gerade durch einen anderen Waldarbeiter bearbeitet wird. Ist dies der Fall, beginnt der Waldarbeiter wieder mit Prozess **005**.

008: Wird der Baum nicht bearbeitet, untersucht der Waldarbeiter, ob es überhaupt noch weitere Waldarbeiter in diesem Bestand gibt.

009: Stellt er fest, dass noch weitere Waldarbeiter anwesend sind, prüft er, ob der Baum, mit dem er sich gerade selbst beschäftigt, einer derjenigen Bäume ist, die einer der anderen Waldarbeiter auf seiner Liste der augenblicklich nicht zur Bearbeitung freigegebenen Bäume aufgeführt hat, befindet. Hier geht es um den durch die Arbeiter aus Gründen der Arbeitssicherheit einzuhaltenden Mindestabstand der doppelten Baumlänge des gerade geernteten Baumes. Arbeitet ein anderer Waldarbeiter einen Baum auf, der zu nahe an demjenigen Baum steht, den der Waldarbeiter in den Prozessen **005-008** überprüft, wird dies dem im Moment baumsuchenden Waldarbeiter durch die Kontrolle der Liste der augenblicklich nicht zur Bearbeitung freigegebenen Bäume mitgeteilt. Befindet sich der Baum aber nicht auf der Liste bzw. werden keine weiteren Arbeiter mehr im Bestand entdeckt…

010: …wird abgeprüft, ob dieser Baum für eine Bearbeitung freigegeben ist. Da alle Bäume aus einer Liste aller zu erntenden Bäume überprüft werden müssen, wird gespeichert, ob der aktuell ausgewählte Baum weiterhin bearbeitet werden darf. Wurde eine „negative Situation" (ein anderer Waldarbeiter steht zu nahe an dem aktuellen Baum) gefunden, wird der Baum als „nicht erlaubt" markiert. Falls der Baum nicht freigegeben wird, beginnt der Waldarbeiter wieder bei Prozess **005**.

011: Ist der Baum aber zur Ernte freigegeben, wird im nächsten Schritt die Distanz des aktuell überprüften Baumes zum Waldarbeiter mit dem Distanzwert des zuvor am nächsten stehenden Baumes verglichen. Ist der neue Wert nun geringer, als der bisherige, also befindet sich dieser aktuell untersuchte Baum näher beim Waldarbeiter, als der bisher Nächste,…

012: …wird dieser im System als am nächsten zum Waldarbeiter befindlicher Baum gespeichert. Die Teilprozesse **005-012** laufen nun solange weiter, bis alle Bäume der Ernteliste überprüft wurden.

013: Ist jeder Baum der Liste untersucht, wird nun gefragt, ob ein zur Ernte vorgesehener Baum für den Waldarbeiter gefunden wurde. Ist dies nicht der Fall…

014: …wird in diesem Prozess ein Zeitraum von drei Sekunden abgewartet, bevor der Waldarbeiter wieder mit Prozess **002** beginnt. Dieses Vorgehen ist notwendig, da es passieren kann, dass sich zwar noch Erntebäume auf der Fläche befinden, diese aber gerade so ungünstig stehen, dass sie sich alle innerhalb der Sicherheitsradien der anderen Waldarbeiter befinden. Durch das Warten für drei Sekunden, das sich auch mehrfach wiederholen kann, wird erreicht, dass der zur Zeit „arbeitslose" Waldarbeiter dann wieder in die Holzernte mit eingreifen kann, wenn die Kollegen mit ihren Bäumen fertig sind, ihre Position verändern und dadurch die anderen Erntebäume wieder für den ersten Waldarbeiter frei werden. Werden keine weiteren Erntebäume mehr gefunden, wird direkt Prozess **021** aktiviert.

015: Wurde aber in der Prozessschleife der Teilprozesse **005-012** ein tatsächlich am nächsten zum Waldarbeiter stehender, nicht gerade durch Andere bearbeiteter und sich nicht im Sicherheitsradius eines anderen Arbeiters befindender Baum gefunden, wird dieser als nächstes Arbeitsobjekt ausgewählt und intern mit einer „wird bearbeitet" Markierung versehen.

016: Der Waldarbeiter bewegt sich nun zu diesem Baum hin, wobei die Visualisierung mit Hilfe der Koordinaten der Baumposition und einer im Hintergrund fest eingestellten Laufgeschwindigkeit von 2,4 km/h umgesetzt wird. Die für das Laufen während der Simulation verbrauchte Zeit fließt allerdings nicht in die Berechnung der GAZ mit ein. Das Laufen dient nur der graphischen Darstellung des Arbeitsprozesses.

017: Im Anschluss wird der Baum gefällt und aufgearbeitet. Die für diese Arbeiten benötigte Arbeitszeit wurde zuvor aus den ausgewählten EST-Tabellen berechnet und wird nun protokolliert, um in das Endergebnis der Simulation mit einfließen zu können.

018: Bevor der Erntevorgang beginnt, wird ein Radius-Objekt mit dem entsprechenden Baum als Mittelpunkt erzeugt (s. Abbildung 65). Dieser Radius symbolisiert den einzuhaltenden Sicherheitsabstand und besitzt als Wert die doppelte Baumlänge des gerade bearbeiteten Baumes, angegeben in Meter.

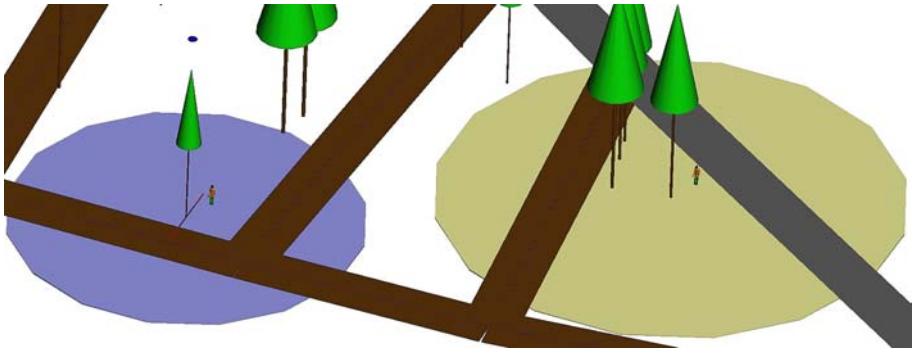


Abbildung 65: Darstellung der Sicherheitsradien bei zwei Waldarbeitern während der Motormanuellen Holzernte

019: Zusätzlich werden die, dem gerade geernteten Baum zugeordneten Sortimente aktiviert und nach Abschluss der Arbeiten anstelle des Baumes platziert.

020: Ist der entsprechende Baum geerntet, aufgearbeitet und sind seine Sortimente platziert, überprüft der Waldarbeiter, ob es noch weitere Bäume zu ernten gibt. Trifft dies zu, beginnt er wieder bei Prozess **003**.

021: Sind keine Erntebäume mehr im Bestand verblieben, begibt sich der Waldarbeiter zu seinem fest definierten Start- und Zielpunkt und beendet seine Arbeit. Haben alle Waldarbeiter nach erledigter Arbeit diesen Punkt erreicht, wird die Simulation automatisch beendet.

5.6.2.7 Übersicht über die Eingangs-, Ausgangs- und Zustandsdaten sowie die graphische Umsetzung im Modell

Zum besseren Verständnis wird in Abbildung 66 noch einmal ein Überblick über alle notwendigen Eingangs-, Ausgangs- und Zustandsdaten des Arbeitssystems gegeben.

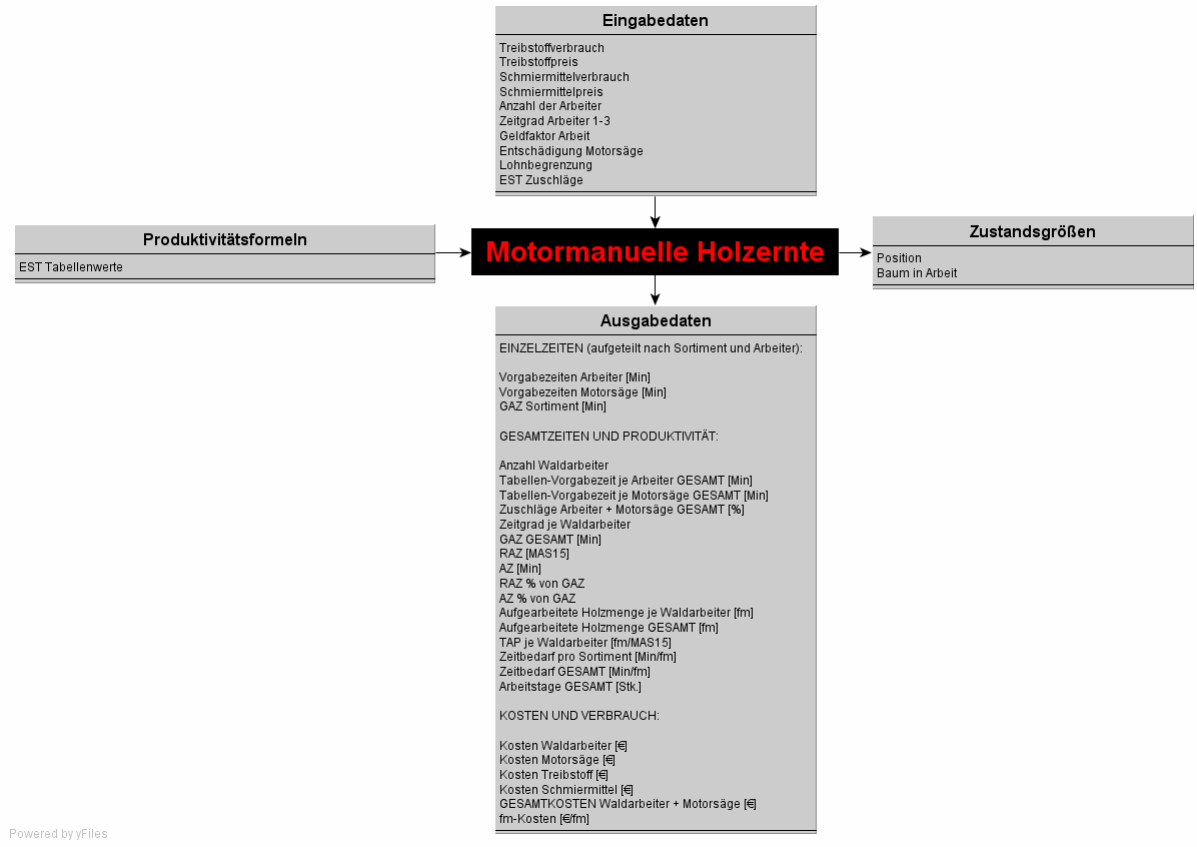


Abbildung 66: Übersicht über die Eingangs-, Ausgangs- und Zustandsdaten des Arbeitssystems Motormanuelle Holzernte

Auch bei der Motormanuellen Holzernte wurden für die graphische Umsetzung spezielle 3D-Modelle der Waldarbeiter entwickelt, die der Nutzer während der gesamten Simulation in der Bestandesumgebung beobachten kann (s. Abbildung 67).

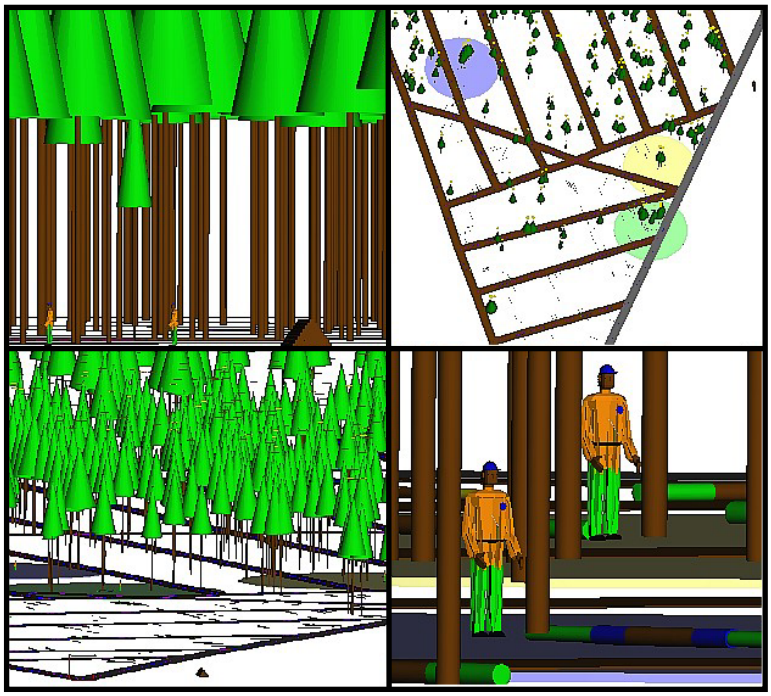


Abbildung 67: Darstellung der Waldarbeiter im Modell

5.6.3 Der Forwarder

Der Forwarder ist ein Fahrzeug zur Rückung von Schichtholz, Kranlängen und Stammholz-Abschnitten. Dabei kann er nur bereits an den Rand einer Forststraße oder Rückegasse vorgeliefertes Holz transportieren. Abschnitte, die nach einem motormanuellen Eingriff noch im Bestand verstreut liegen, befinden sich normalerweise außer Reichweite der Maschine und müssen zuerst vorgerückt werden. Mit einem aufgebauten Kran wird das Holz auf das Fahrzeug geladen und aus dem Bestand abgefahren (VALENTA, NERUDA, 2004).

5.6.3.1 Benutzeroberfläche und einstellbare Parameter

Abbildung 68 zeigt die Benutzeroberfläche des aktuellen Modells, in dem sämtliche Parameter für das System Forwarder verändert werden können. Die zahlreichen Einstellungsmöglichkeiten werden in Tabelle 10 erklärt.

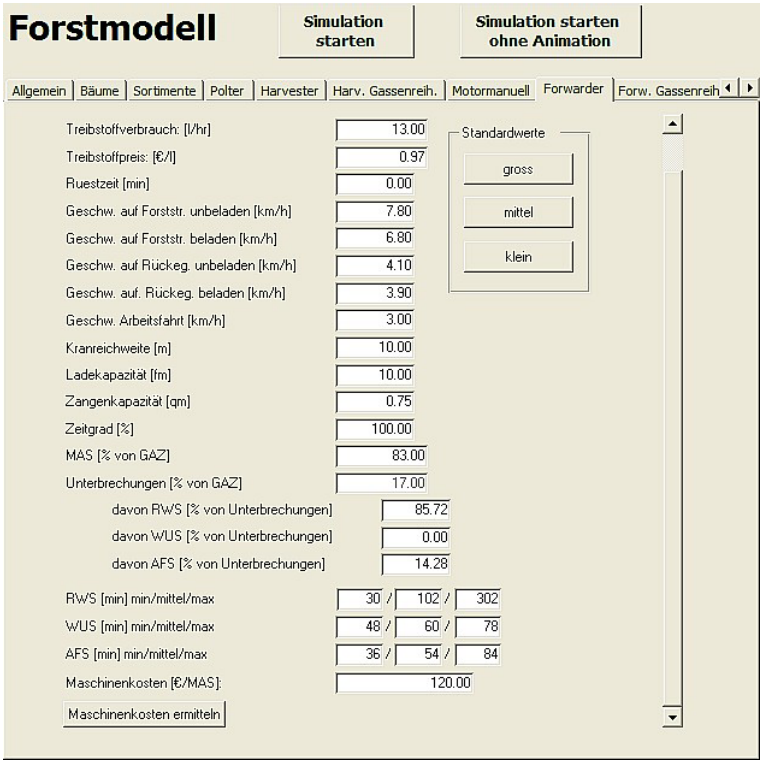


Abbildung 68: Menü des Arbeitssystems Harvester zur Einstellung der verschiedenen Parameter

Tabelle 10: Erläuterungen zu den einstellbaren Systemparametern des Systems Forwarder

Parameter	Wert [Einheit]	Bemerkungen	Quelle
Treibstoffverbrauch	18.00 [l/hr]	Der Verbrauch kann je nach Maschinentyp variieren.	FELDKÖTTER, 2004
Treibstoffpreis	[€/l]	Frei wählbarer Wert	
Ruestzeit	[Min]	Frei wählbarer Wert. Die Rüstzeit dient der Vorbereitung der Maschine vor dem eigentlichen Arbeitbeginn.	
Fahrgeschwindigkeit beladen auf der Forststraße	6,8 [km/h]	Die Beschleunigung ist aufgrund mangelnder Daten nicht berücksichtigt; In einer erweiterten Version des Modells ist der Einbau eines „Geländefaktors“ zur Darstellung der Geländeeinwirkungen für alle Fahrgeschwindigkeiten vorgesehen	VON BODELSCHWINGH, 2004
Fahrgeschwindigkeit unbeladen auf der Forststraße	7,8 [km/h]	Die Beschleunigung ist aufgrund mangelnder Daten nicht berücksichtigt	VON BODELSCHWINGH, 2004
Fahrgeschwindigkeit beladen auf der Rückegasse	3,9 [km/h]	Die Beschleunigung ist aufgrund mangelnder Daten nicht berücksichtigt	VON BODELSCHWINGH, 2004
Fahrgeschwindigkeit unbeladen auf der Rückegasse	4,1 [km/h]	Die Beschleunigung ist aufgrund mangelnder Daten nicht berücksichtigt	VON BODELSCHWINGH, 2004
Fahrgeschwindigkeit während des Beladevorgangs auf der Rückegasse (Arbeitsfahrt)	3,0 [km/h]	Die Beschleunigung ist aufgrund mangelnder Daten nicht berücksichtigt	VON BODELSCHWINGH, 2004
Kranreichweite	10 [m]	Entspricht dem maximalen Abstand vom jeweiligen Haltepunkt auf der Mitte der Rückegasse bis zur Position des zu greifenden Abschnittes	www.timberjack.de, 2003
Ladekapazität	10 [fm]		www.timberjack.de, 2003
Zangenkapazität	0,75 [m^2]	Die Fläche wird verglichen mit der Summe der Grundflächen, gemessen in der Mitte jedes zu transportierenden Abschnittes; An dieser Stelle wird erst einmal dieser Wert verwendet, da für die Forwarder-Zange noch keine Daten vorliegen	www.timberjack.de, 2003
Zeitgrad [%]	[%]	Frei wählbar; dient der Simulation unterschiedlicher Fahrerleistungen	
MAS [% von MS]	[%]	Frei wählbar; beschreibt den Anteil produktiver Maschinenarbeitsstunden [MAS] an der Gesamtarbeitszeit [GAZ]. Dient der Simulation unterschiedlicher Störungsanfälligkeiten.	
Unterbrechungen [% von MS]	[%]	Anteil der Unterbrechungen an der Gesamtarbeitszeit (GAZ). Dieser Wert errechnet sich automatisch nach Voreinstellung der „MAS [% von MS]“.	
Davon RWS, WUS und AFS [% von Unterbrechungen]	[%]	Anteile der drei Unterbrechungstypen an der gesamten Unterbrechungsdauer (hier wieder 100 %).	
RWS	Minimum 54 [Min/Schicht] Most likely 186 [Min/Schicht] Maximum 498 [Min/Schicht]	RWS (Reparatur- und Wartungsstunden), Es wird eine Dreiecksfunktion (beschrieben durch einen wahrscheinlichsten, einen minimalen und einen maximalen Wert) hinterlegt.	FELDKÖTTER, 2004
WUS	Minimum 48 [Min/Schicht] Most likely 60 [Min/Schicht] Maximum 84[Min/Schicht]	WUS (Wege- und Umsetzstunden, reiner Umsetzvorgang), Zusatzoption für den Nutzer, es wird eine Dreiecksfunktion (beschrieben durch einen wahrscheinlichsten, einen minimalen und einen maximalen Wert) hinterlegt.	FELDKÖTTER, 2004
AFS	Minimum 48 [Min/Schicht] Most likely 66 [Min/Schicht] Maximum 120 [Min/Schicht]	AFS (Sonstige Ausfallstunden, nicht tariflich festgelegt; gehen nicht in MAS, RWS, WUS ein; z.B. Warten auf Förster, im Schlamm festgefahren), Es wird eine Dreiecksfunktion (beschrieben durch einen wahrscheinlichsten, einen minimalen und einen maximalen Wert) hinterlegt.	FELDKÖTTER, 2004
Maschinenkosten	[€/MAS]	Kostensatz, der sich entweder pauschal festlegen oder über eine spezielle „Maschinenkostenkalkulation“ extra berechnen lässt.	

Beim Forwarder ist es ebenso wie beim Harvester möglich, über eine Maschinenkostenkalkulation den genauen Kostensatz einer bestimmten Maschine rechnerisch herzuleiten. Außerdem muss auch für das System Forwarder vor Beginn der Simulation eine Gassenreihenfolge festgelegt werden, damit eine sinnvolle Routenführung garantiert ist (s. Kapitel 5.6.1.3). Der Forwarder wird beispielsweise, nachdem der Harvester einen Vorsprung von einer Rückegasse erarbeitet hat (frei wählbare, vordefinierte Distanz), aktiviert und fährt die ersten vom Harvester abgelegten Stammabschnitte an.
Die **Rückestrategie** ist im Frontend durch den Benutzer in Form der so genannten „Sorten-Gruppen-Nummer“ einstellbar (s. Abbildung 69). Es ist möglich, alle Lose einzeln zu rücken, indem man jedem Los eine Nummer zuordnet. Beginnend bei „1“ entspricht die hier eingestellte Reihenfolge genau der Reihenfolge, in der die Maschine die Abschnitte der einzelnen Lose rücken wird. Möchte der Nutzer aber die Abschnitte unterschiedlicher Lose (z.B. CGW und Palette) gemeinsam rücken lassen, so ordnet er diesen Losen dieselbe Sorten-Gruppen-Nummer zu. Dadurch erkennt das System, dass diese Lose beim Rückeprozess gemeinsam gerückt werden sollen.
Der Forwarder hat den Auftrag, so lange Stammabschnitte zu laden, bis sein maximales Ladevolumen erreicht ist. Unterschiedliche Sortimente (z.B. LPZ und Papierholz) verbrauchen auf dem Rungenkorb aber naturgemäß unterschiedlich viel Platz, da bei einem kleinen Durchmesser der einzelnen Abschnitte und entsprechend hohen Stückzahlen, die es ja z.B. beim Papierholz gibt, weitaus mehr „Hohlräume“ (Kavernen) zwischen den einzelnen Stücken entstehen als beispielsweise bei weitaus dickeren LPZ-Abschnitten. Dieser Tatsache wird durch den Einbau eines „Volumenfaktors“ für jedes Sortiment Rechnung getragen (s. Abbildung 69).

	Los_Nr	Sortiment	SortenGruppeNr	Volumenfaktor	Baumart
	1	STH - 6m	1	70	1
	2	STH - 4m	2	100	1
	3	IL 3-7m	3	70	1
	4	IS 1m	3	140	1

Abbildung 69: Menü zur Einstellung von Sortengruppennummer und Volumenfaktor

Dieser Volumenfaktor wird auf jedes Sortimentsstück jedes einzelnen Loses angewendet und erhöht oder vermindert die tatsächliche Masse dieses Stückes entsprechend. Dadurch wird der Effekt erzielt, dass ein Forwarder mit einer Voreinstellung der maximalen Beladekapazität von z.B. 10 m^3 nicht wirklich 10 m^3 Holz auflädt, sondern eine geringere Masse, die aber entsprechend um den Volumenfaktor vergrößert worden ist. Zusätzlich ist es jederzeit möglich, sich im Modell den aktuellen Beladezustand des Forwarders anzeigen zu lassen.
Die Maschine wird immer den kompletten, letzten gefüllten Greifer Holz aufladen. Das heißt, dass sie teilweise auch leicht überladen fahren darf. Sie steuert dann den nächstgelegenen Holzlagerplatz an, auf dem die Stammabschnitte gepoltert werden. Allerdings ist es notwendig, dass dieser auch vor Beginn der Simulation „frei geschaltet“ worden ist (s. Abbildung 70). Der Nutzer kann selbst entscheiden, bestimmte Polter zu deaktivieren, was bedeutet, dass der Forwarder an diesen Poltern kein Holz ablegen kann. Zusätzlich kann noch eine so genannte Polternummer vergeben werden. Dabei ist aber lediglich die Nummer „1“ entscheidend, denn dasjenige Polter, das mit einer „1“ versehen wird, wird zu Beginn der Simulation als erstes und am Ende als letztes angefahren.

	PolterNr	Poltername	aktiviert
	3	Holzlager_sued	☐
	2	Holzlager_suedost	☐
	1	Holzlager_nordost	☑
	4	Holzlager_nord	☐
▶	0		▩

Abbildung 70: Menü zur Polteraktivierung und Vergabe der Polternummer

Wird der Forwarder in Kombination mit den Arbeitssystemen Harvester und/oder Motormanuelle Ernte simuliert, ist es wichtig, dass bei der Einstellung der Schichten der Startzeitpunkt der Maschine entsprechend spät eingestellt wird, damit zu Beginn der Forwarder-Schicht auch schon ausreichend Abschnitte produziert worden sind. Hier kann man durch iteratives Vorgehen den optimalen Startzeitpunkt herausfinden.

5.6.3.2 Aufbau und Einsatz der Kalkulationsformeln

Die Voreinstellungen der einzelnen Größen im Menü des Systems, aber auch die Eigenschaften des Erschließungsnetzes und der zu rückenden Abschnitte stellen Attribute dar, die das Ergebnis einer Forwarder-Simulation entscheidend beeinflussen. Um diese Effekte möglichst realitätsgetreu abzubilden, wurden von PAUSCH (2004) sowie von PAUSCH und VON BODELSCHWINGH (2003) spezielle, dem Modell hinterliegende Formeln für die Berechnung der einzelnen Größen entwickelt. Dabei darf die Formel für das Beladen des Forwarders aus rechtlichen Gründen nicht kommplett in Tabelle 11 veröffentlicht werden, da sie im Rahmen eines Projektes des Landes Nordrhein-Westfalen entwickelt wurde und nicht für die Weitergabe an Dritte freigegeben ist. Für diese Formel werden allerdings die Einflussgrößen mit aufgeführt.

Tabelle 11: Formeln zur Berechnung der einzelnen Systemparameter

Arbeitsabschnitt	Einflussgrößen bzw. Formel	Bemerkungen	Quelle
Formeln zur Berechnung der Rückeprozesse des Forwarders			
Dauer Beladen [s]	N/Zyklus, Vol/Zyklus	N/Zyklus = Anzahl der Abschnitte in der Zange; Vol/Zyklus = Gesamtvolumen der Abschnitte in der Zange	PAUSCH, 2004
Dauer Entladen	Dauer [s] = 39,868 + 45,343 * Holzvolumen [Efm o. R./Fuhre] + 1,526 * N Laden - 211,967	Holzvolumen [Efm o. R./Fuhre] = Gesamtes, aufgeladenes Volumen für diesen Zyklus; N Laden = Summe aller Abschnitte, die bei diesem Zyklus aufgeladen wurden; gilt für Fuhren zwischen ca. 6 und 12 m³; bei Fuhren mit einem Volumen < 6 m^3, wird der entsprechende Wert einer 6 m^3-Fuhre berechnet und mit der tatsächlich aufgeladenen Masse ins Verhältnis gesetzt; dabei wird N Laden wie folgt berechnet: (6.0 m^3/Vol der aktuellen Fuhre) * Stückzahl der aktuellen Fuhre	VON BODELSCHWINGH, PAUSCH, 2003
Zusätzliches Kranen beim Entladen	Dauer [s/ Efm] = 5,52 (Mittel Var 6,7)	Dieser Wert wird beim Entladen auf die Gesamtdauer des Entladevorgangs aufaddiert	VON BODELSCHWINGH, PAUSCH, 2003

Aussagen zur Verwendung der einzelnen Systemparameter bei der Berechnung der gesuchten Zielgrößen im Modell finden sich in Anhang IX.

5.6.3.3 Systemlogik und Ablaufdiagramm

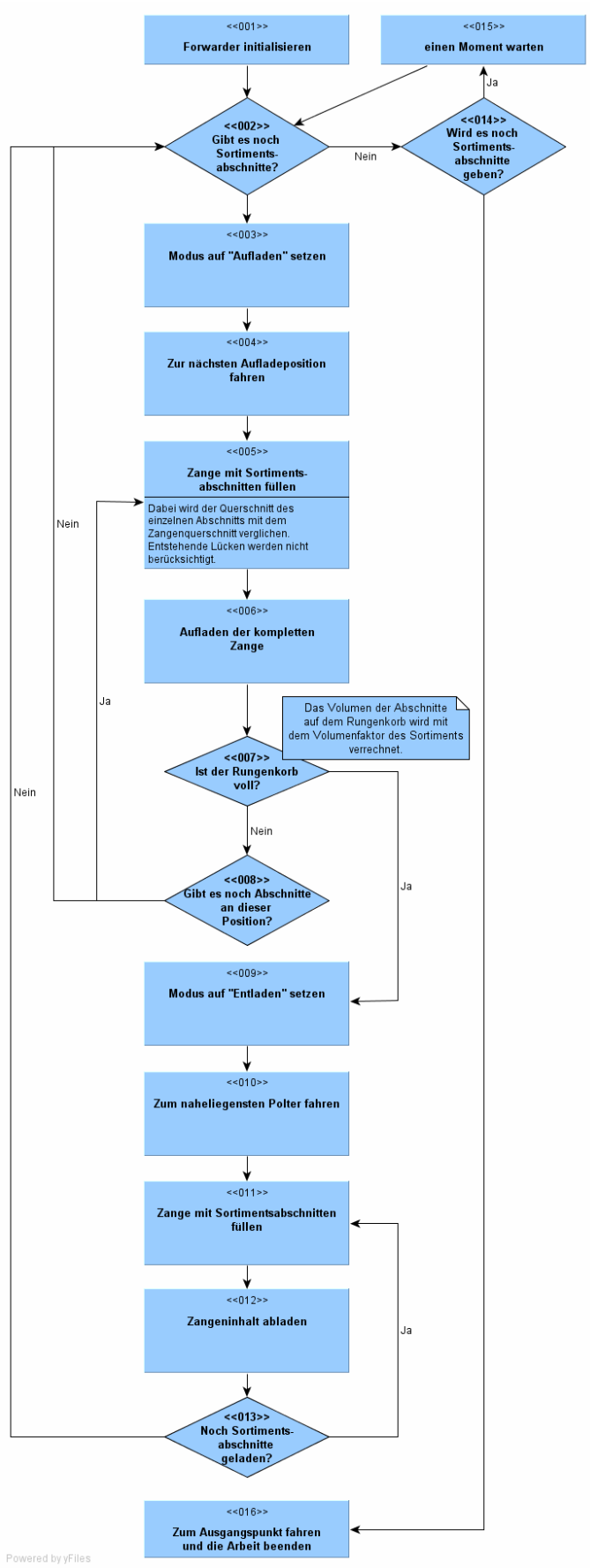


Abbildung 71: Ablaufdiagramm für das Arbeitssystem Forwarder

001: Zu Beginn des Simulationslaufes wird der Forwarder initialisiert und an einem zuvor im Modell fest definierten Startpunkt platziert (s. Abbildung 71).

002: Dann wird überprüft, ob sich an den Forststraßen und Rückegassen noch Sortimentsabschnitte befinden, die gerückt werden müssen. Alle Sortimentsabschnitte, die im gesamten System entstehen, werden in einer Liste festgehalten. Nach Ablage der Abschnitte am Polter, werden diese aus der Liste gelöscht. Ist die Liste leer, sind keine weiteren Sortimentsabschnitte mehr zu bearbeiten. Ist dies der Fall, geht es sofort mit Prozess **014** weiter.

003: Sind aber noch Abschnitte im Bestand vorhanden, wird der Modus „Aufladen“ des Forwarders aktiviert. Im Modus „Aufladen“ fährt der Forwarder von Aufladeposition zu Aufladeposition und belädt seinen Rungenkorb.

004: Nun bewegt sich der Forwarder von seinem Startpunkt aus die Rückegassen entlang, die ihm durch den Nutzer in einer bestimmten Reihenfolge vorgegeben wurden. Dabei bewegt er sich je nach Wegtyp und Beladezustand mit der zuvor entsprechend eingestellten Fahrgeschwindigkeit. An der ersten Aufladeposition, die er erreicht, hält er an.

005: Die Greifzange am Ende des Krans wird nun mit den Abschnitten, die am Wegesrand liegen, gefüllt. Dabei kann es passieren, dass der Forwarder aufgrund der Limitierung der Zangenkapazität nicht alle Abschnitte, die sich an einer Aufladeposition befinden, auf einmal greifen kann. In diesem Fall sind mehrere Kranzyklen notwendig. Außerdem kann es sein, dass die Einstellung der Sortengruppen dazu führt, dass der Forwarder nur einzelne Abschnitte an den Aufladepositionen mitnimmt und erst im weiteren Verlauf der Simulation den verbliebenen Rest abholt. Die benötigte Arbeitszeit wird dabei mit Hilfe der entsprechenden Produktivitätsformel berechnet.

006: Der Zangeninhalt wird auf den Rungenkorb geladen, wobei nun die durch den Volumenfaktor veränderten Volumina aufaddiert werden.

007: Dann wird nach jedem Beladezyklus überprüft, ob der Korb schon voll ist.

008: Ist der Korb noch nicht komplett gefüllt, überprüft der Forwarder, ob sich an der weiteren Strecke, die er noch fahren muss, zusätzliche Sortimentsabschnitte befinden. Trifft dies zu, fährt er zur nächsten Aufladeposition und beginnt erneut mit Prozess **005**.

009: Ist der Rungenkorb aber voll, wird beim Forwarder der Modus „Entladen“ aktiviert.

010: Nun sucht sich die Maschine den zu ihrer Position am nächsten befindlichen Polter an der Waldstraße aus und fährt ihn an.

011: Am Polter angekommen, wird die Zange bis zur maximalen Kapazität mit Abschnitten gefüllt.

012: Die Abschnitte werden dann am Polter abgeladen.

013: Nach jedem Kranzyklus überprüft der Forwarder erneut, ob noch weitere Sortimente im Rungenkorb geladen sind. Wenn ja, beginnt er bei Prozess **011** einen neuen Zyklus. Ist der Korb allerdings komplett geleert, wird Prozess **002** wieder aktiviert.

014: Findet der Forwarder keine weiteren Sortimentsabschnitte mehr im gesamten Bestand, prüft er, ob es überhaupt noch weitere Abschnitte in diesem Simulationslauf geben wird. Dies kann dann der Fall sein, wenn der Forwarder in Kombination mit einem Harvester oder Schlepper simuliert wird. Bei solchen Maschinenkombinationen kann es vorkommen, dass Harvester oder

Schlepper im weiteren Verlauf ihrer Tätigkeit wieder neue Abschnitte an die Straßen und Gassen ablegen bzw. vorrücken.

015: Daher wartet der Forwarder eine Minute ab, und beginnt dann ggf. erneut mit Prozess **002**.

016: Sind aber alle Abschnitte, die durch die Holzernte produziert und an die entsprechenden Forststraßen und Rückegassen vorgeliefert wurden durch den Forwarder zu den Poltern gerückt, begibt sich die Maschine zu ihrer Ausgangsposition und beendet damit den Simulationslauf.

5.6.3.4 Übersicht über die Eingangs-, Ausgangs- und Zustandsdaten sowie die graphische Umsetzung im Modell

Die Übersicht über alle notwendigen Eingangs-, Ausgangs- und Zustandsdaten des Arbeitssystems zeigt noch einmal die Zusammenhänge innerhalb der Systemmodellierung für den Forwarder (s. Abbildung 72).

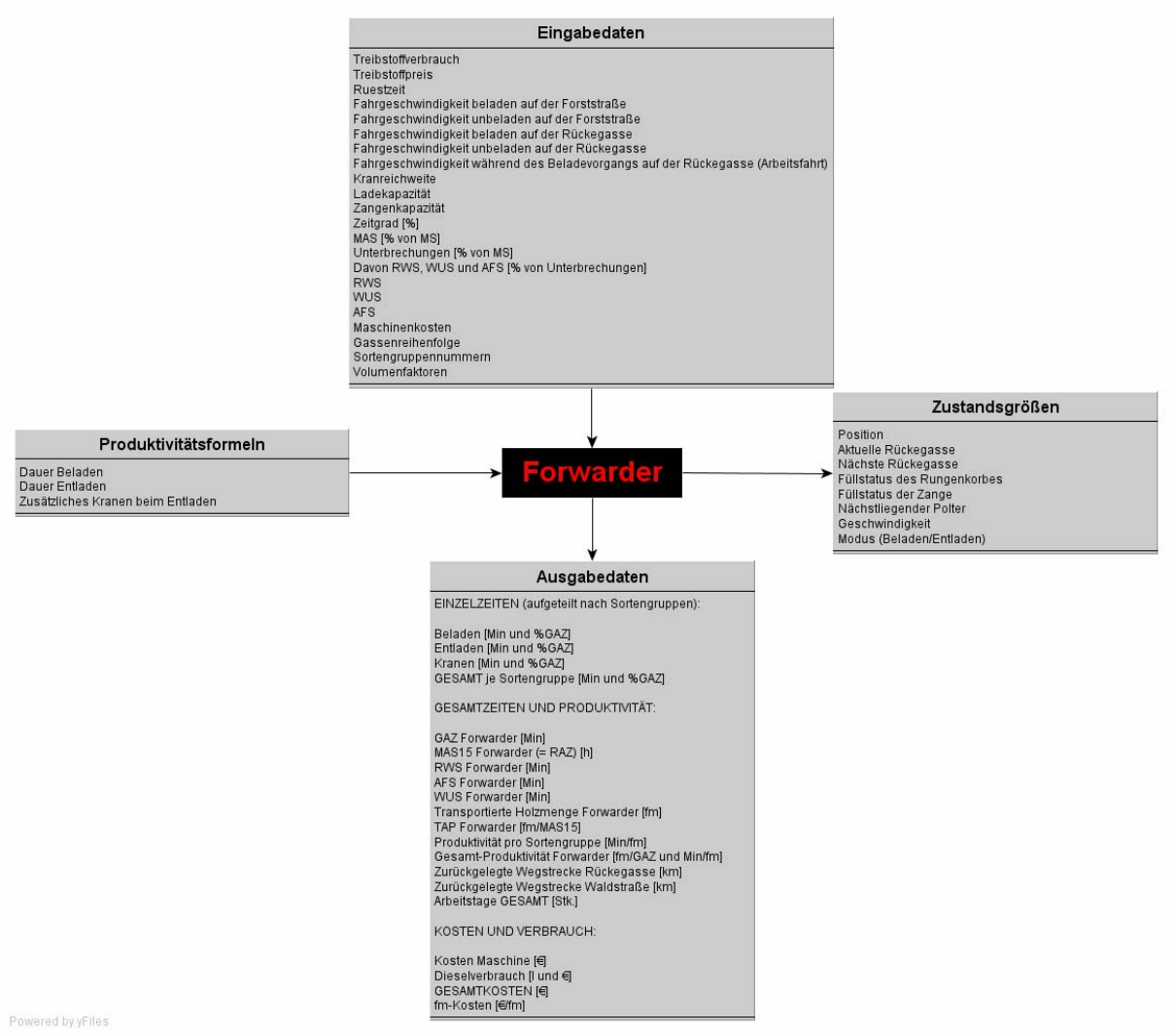


Abbildung 72: Übersicht über die Eingangs-, Ausgangs- und Zustandsdaten des Arbeitssystems Forwarder

Für den Forwarder wurde bei der graphischen Umsetzung ebenfalls ein spezielles 3D-Modell entwickelt, das der Nutzer während der gesamten Simulation in der Bestandesumgebung beobachten kann (s. Abbildung 73).

Abbildung 73: Darstellung des Forwarders im Modell

5.6.4 Der Schlepper

Simuliert wird ein Forstspezialschlepper mit Seilwinde und Rückezange. Der Schlepper ist in der Lage, das Holz sowohl vorzurücken, als auch den Transport zur Waldstraße mit Hilfe einer Seilwinde oder Rückezange durchzuführen. Das Holz wird hierbei am Boden geschleift und nicht wie beim Forwarder in einem Rungenkorb transportiert. Der Schlepper wird überwiegend für das Beiseilen von Vollbäumen aber auch Stammabschnitten und für das Rücken von Langholz eingesetzt (nach SAGOWSKI, 1988).

5.6.4.1 Benutzeroberfläche und einstellbare Parameter

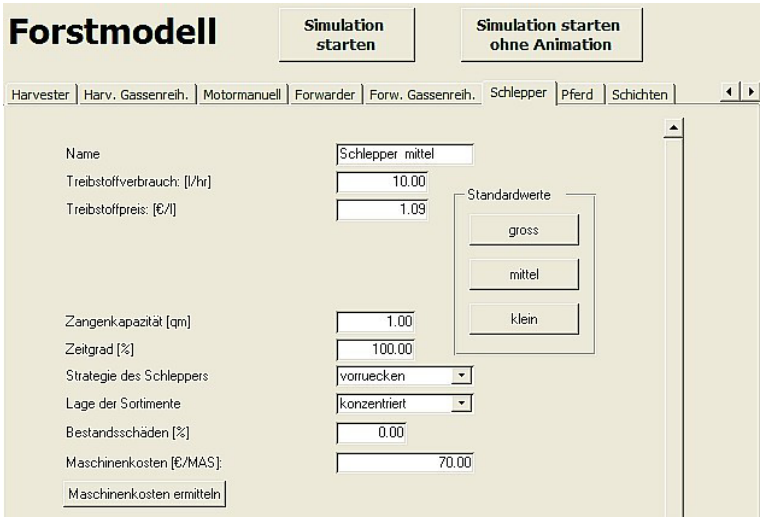


Abbildung 74: Menü des Arbeitssystems Schlepper zur Einstellung der verschiedenen Parameter

Auch bei diesem Arbeitssystem besteht die Möglichkeit, den Treibstoffverbrauch, den Treibstoffpreis, die Zangenkapazität, die Maschinenkosten sowie einen Zeitgrad zur Darstellung unterschiedlicher Fahrerleistungen festzulegen (s. Abbildung 74). Dieser Wert dient dann als Faktor zur Umrechnung der entsprechenden Gesamtarbeitszeit. Zusätzlich ist ein Zuschlagswert für während der Arbeit aufgetretene Bestandesschäden einstellbar. Alle weiteren einstellbaren Systemparameter sind in Tabelle 12 aufgeführt.

Tabelle 12: Erläuterungen zu den einstellbaren Systemparametern des Systems Schlepper

Parameter	Wert [Einheit]	Bemerkungen	Quelle
Treibstoffverbrauch	12 [l/MAS]	Der Verbrauch kann je nach Maschinentyp variieren.	www.timberjack.de, 2003
Treibstoffpreis	[€/l]	Frei wählbarer Wert	
Ruestzeit	[Min]	Frei wählbarer Wert. Die Rüstzeit dient der Vorbereitung der Maschine vor dem eigentlichen Arbeitbeginn.	
Zangenkapazität	0,75 [m^2]	Dieser Wert gilt für die Zange eines Timberjack 360 D; die Fläche wird verglichen mit der Summe der Grundflächen, gemessen in der Mitte jedes zu transportierenden Abschnittes;	www.timberjack.de, 2003
Zeitgrad [%]	[%]	Frei wählbar; dient der Simulation unterschiedlicher Fahrerleistungen	
Strategie des Schleppers	„Vorrücken“ oder „Rücken“	Die Strategie des Schleppers ist frei wählbar, wenn das System alleine simuliert wird. Wird eine Kombination mit anderen Arbeitssystemen für die Simulation ausgesucht, ist die jeweilige Strategie automatisch eingestellt.	
Lage der Sortimente	„verteilt“ oder „konzentriert“	Die Lage der Sortimente im Bestand ist frei wählbar, wenn das System alleine simuliert wird. Wird eine Kombination mit anderen Arbeitssystemen für die Simulation ausgesucht, ist die jeweilige Lage automatisch eingestellt.	
Bestandesschäden	[%]	Der Nutzer kann in diesem Feld unter Berücksichtigung der entsprechenden Zuschlagstabelle einen Prozentsatz als Zuschlag für entstandene Bestandesschäden festlegen.	
Maschinenkosten	[€/MAS]	Kostensatz, der sich entweder pauschal festlegen oder über eine spezielle „Maschinenkostenkalkulation“ extra berechnen lässt.	

5.6.4.2 Ermittlung der Tabellen-Vorgabezeit (GAZ) pro Stammabschnitt für den Schlepper auf Grundlage des Schleppertarifs des Landes Nordrhein-Westfalen

Zur Berechnung der Leistungswerte für den Seilschlepper wird der Schleppertarif des Landes Nordrhein-Westfalen eingesetzt (SCHLEPPERTARIF NRW, 2003). Dieser ermöglicht die Ermittlung der Gesamtarbeitszeit (GAZ) in Minuten pro Festmeter. Dabei wird zwischen drei Szenarien unterschieden:

Der Nutzer muss vor Beginn der Simulation festlegen, ob die Sortimentsabschnitte nach Motormanueller Holzernte im Bestand verstreut vorliegen und von dort aus zur Waldstraße gerückt werden sollen, ob sie schon vom Harvester bzw. vom Pferd an der Rückegasse vorkonzentriert wurden und nun bis zur Straße gebracht werden sollen oder, ob der Schlepper lediglich das Vorrücken aus dem Bestand an die Rückegasse übernehmen soll. Dementsprechend werden drei unterschiedliche Formeln zur Leistungsberechnung verwendet (s. Abbildung 75).

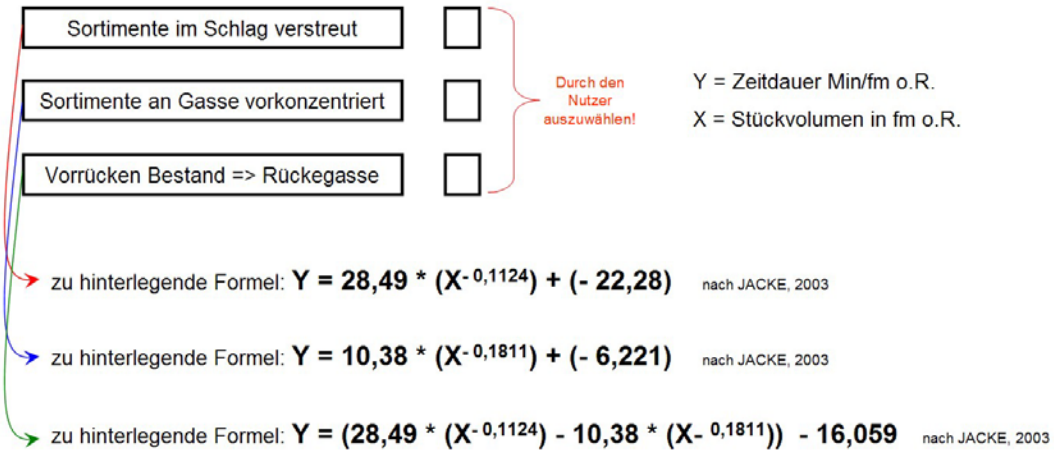
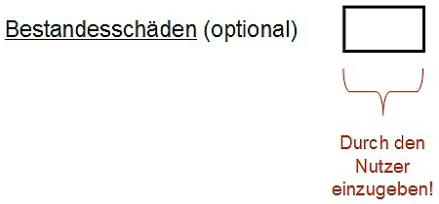


Abbildung 75: Struktur der verschiedenen Arbeitsstrategien des Schleppers

5.6.4.3 Festlegung und Einbeziehung der Zuschläge für Bestandesschäden

In Abbildung 76 sind die zur Auswahl stehenden Zuschläge für Bestandesschäden sichtbar. Es ist möglich, eine entsprechende Prozentzahl einzusetzen, die dann auf die Vorgabezeit des Schleppertarifs angewendet wird.



Bereich	Zuschlagshöhe
< 5 %	+ 10 %
➢ 5 – 10 %	Basis
➢ 10 – 15 %	- 10 %
➢ 15 – 20 %	- 15 %
➢ 20 – 25 %	- 20 %
➢ 25 – 30 %	- 25 %

Abbildung 76: Struktur der Zu- und Abschläge für Bestandesschäden

5.6.4.4 Aufbau und Einsatz der Kalkulationsformeln des Schleppertarifs NRW

Die Voreinstellungen der einzelnen Größen im Menü des Systems, aber auch die Eigenschaften des Erschließungsnetzes und der zu rückenden Stämme und Stammabschnitte stellen Attribute dar, die das Ergebnis einer Schlepper-Simulation entscheidend beeinflussen. Um diese Effekte möglichst realitätsgetreu abzubilden, wird der Schleppertarif des Landes Nordrhein-Westfalen in das Modell integriert. Die entsprechenden Formeln zur Berechnung der GAZ werden in Tabelle 13 aufgeführt.

Tabelle 13: Formeln zur Berechnung der einzelnen Systemparameter

Arbeitsabschnitt	Formel	Bemerkungen	Quelle
Formeln zur Berechnung der Vorrück- und Rückeprozesse des Schleppers			
Sortimente im Schlag verstreut	Formel für den kompletten Rückeprozess: $Y = 28,49 * (X^{-0,1124}) + (- 22,28)$	Y = Min/fm o.R. X = Stückvolumen in fm o.R.	JACKE, 2003
Sortimente an Gasse vorkonzentriert	Formel für den kompletten Rückeprozess: $Y = 10,38 * (X^{-0,1811}) + (- 6,221)$	Y = Min/fm o.R. X = Stückvolumen in fm o.R.	JACKE, 2003
Vorrücken Bestand => Rückegasse	Formel für den Teilprozess „Vorrücken“: $Y = (28,49 * (X^{-0,1124}) - 10,38 * (X^{-0,1811}) - 16,059$	Y = Min/fm o.R. X = Stückvolumen in fm o.R.	JACKE, 2003

Aussagen zur Verwendung der einzelnen Systemparameter bei der Berechnung der gesuchten Zielgrößen im Modell finden sich in Anhang IX.

Vor dem Start der eigentlichen Simulation wird für jeden einzelnen Stammabschnitt der Bäume des ausscheidenden Bestandes die GAZ berechnet, die der Schlepper benötigt, um sie je nach eingestellter Strategie an die Waldstraße bzw. an die Rückegasse zu liefern. Dabei ist es wichtig, darauf zu achten, dass die GAZ, die mit Hilfe des Schleppertarifes errechnet wird, immer in Minuten/fm angegeben wird. Eine Umrechnung auf die tatsächliche Stückmasse des jeweiligen Abschnittes ist also notwendig. Die erhaltene GAZ wird dann, ebenfalls für jeden einzelnen Abschnitt, mit dem entsprechenden Zeitgrad und den entsprechenden Zuschlägen verrechnet. Erst jetzt liegt die korrekte GAZ vor.

Die hier errechneten Werte beziehen sich auf die GAZ. Um die RAZ zu ermitteln und die TAP (Fm/MAS) berechnen zu können, muss der Wert um die Allgemeinen Zeiten reduziert werden; in diesem Fall um 20%. Dies bedeutet, dass man den errechneten fm/h-Wert wie folgt aufschlüsseln kann:

GAZ: Gesamtdauer des (Vor-)Rückeprozesses
RAZ: errechnet sich durch die Subtraktion von 20 % des GAZ-Wertes, also durch Subtraktion der AZ
AZ: entspricht 20 % der GAZ

Die RAZ ist mit Hilfe folgender %-Werte wie folgt aufzuschlüsseln (nach KULUSIC, 1971, S. 111-118):

	Studie 1	Studie 2	Studie 3	Studie 4		**Mittelwert**
Leerfahrt/Positionieren	8,7 %	9,1 %	7,9 %	8,1 %		**8 %**
Seil ausziehen	0,6 %	0,7 %	0,6 %	0,7 %		**1%**
Anhängen	30,5 %	31,9 %	37 %	39,5 %		**35 %**
Seil einziehen/Aufladen	11,2 %	11,6 %	10,1 %	10,3 %		**11 %**
Lastfahrt	10,1 %	12,3 %	9,1 %	10,9 %		**11 %**
Abhängen	10,5 %	11,9 %	9,6 %	10,6 %		**11 %**
Poltern	28,4 %	22,6 %	25,8 %	20 %		**24 %**
RAZ [%]	100 %	100 %	100 %	100 %		**100 %**

Abbildung 77: Prozentwerte zur Reduzierung der GAZ auf RAZ-Niveau und Aufteilung der RAZ in die einzelnen Prozess-Abschnitte

Wie in Abbildung 77 aufgezeigt, ist es im nächsten Schritt notwendig, die errechnete GAZ inklusive der Zuschläge auf das Niveau der Reinen Arbeitszeit (RAZ) zu reduzieren. Der anzuwendende Prozentwert beträgt 20 % der GAZ. Die erhaltene RAZ soll dann noch in die einzelnen Prozess-

Abschnitte von „Leerfahrt“ bis „Poltern“ unterteilt werden. Sämtliche Teilprozesse und die dazu gehörenden Prozentwerte sind Abbildung 77 zu entnehmen. Diese Vorgehensweise ist nötig, um im Ergebnisfenster die ungefähre Dauer jedes einzelnen Arbeitsschrittes darstellen zu können. Wie oben bereits erwähnt, werden die Fahrzeiten aus der GAZ bzw. aus der RAZ herausgerechnet und durch die neu ermittelten Werte ersetzt.
Weiterhin wird bei der Reduzierung der GAZ auf RAZ-Niveau automatisch die entsprechende Dauer der AZ ermittelt. Dieser Wert soll ebenfalls im Ergebnisfenster aufgeführt werden.
Zusammenfassend noch einmal das Vorgehen zur Ermittlung von GAZ, RAZ und AZ beim Forstspezialschlepper:

- Berechnung der Tarif-Vorgabezeit (GAZ) für den Forstspezialschlepper für jedes einzelne Sortimentsstück; entweder für verstreut herumliegendes oder für vorkonzentriertes Holz
- Hinzufügen der Zuschlagswerte zur GAZ für die entsprechende Erntemaßnahme
- Einbeziehung des Zeitgrades für den Forstspezialschlepper
- Aufteilung der GAZ in RAZ und AZ mit Hilfe der entsprechenden Prozentwerte

5.6.4.5 Kostensätze

Bei den Kalkulationen mit dem System Schlepper wurde folgender Wert verwendet (s. Tabelle 14).

Tabelle 14: Lohnfaktoren für das Rücken mit Schleppern

Leistung	Wert	Quelle
Kostensatz Rücken mit Seilschlepper	56,47 €/MAS	JACKE, 2003

5.6.4.6 Systemlogik und Ablaufdiagramm

Der Zangenschlepper mit Seilwinde dient sowohl zum Vor- als auch zum Endrücken des aufgearbeiteten Holzes (s. Abbildung 78). Zu Beginn begibt sich der Schlepper, ausgehend vom Interaktionspunkt, über die Waldstraße zur nächstgelegenen Rückegasse und dort zu den nächstgelegenen Sortimenten. Vor Ort angekommen, hält der Schlepper an. Nun wird das Seil von der Winde ausgezogen. Je nach Leistungsfähigkeit des Schleppers wird eine bestimmte Anzahl Kurzholzabschnitte bzw. Langholz an das Seil angehängt. Dann wird das Seil eingezogen und das Holz auf diese Weise an die Rückegasse transportiert. Je nach Voreinstellung, wird das Holz direkt von der Zange des Schleppers gegriffen und sofort zum nächstgelegen Holzlager gerückt. Auf diese Weise bewältigt der Schlepper die Vorrückung und Rückung für den gesamten Bestand. Am Ende seiner Arbeit kehrt er zum Interaktionspunkt zurück. Der Schlepper soll nicht losrein vorrücken und rücken, d.h. er liefert alle im Bestand liegenden Abschnitte zusammen vor. Allerdings soll an der Gasse bzw. am Holzlager das Holz entsprechend sortiert werden. Dabei greift er mit der Zange immer nur die Abschnitte bzw. das Stammholz an einer Position im Bestand. Das bedeutet, dass er in der graphischen Darstellung nicht solange durch den Bestand fährt, bis die Zange gefüllt ist, sondern, dass er nach dem Beladen der Zange immer direkt zum nächsten Holzlager fährt und dort ablädt.

Die Tatsache, dass sich der Schlepper immer nach dem Prinzip des nächsten zu rückenden Abschnittes durch den Bestand bewegt, kann zu einer etwas unkonventionell erscheinenden Routenwahl führen. Da aber die Fahrzeiten nicht extra mit in die Zeitberechnung der Simulation einfließen, sind die zum Teil „überflüssig“ erscheinenden Wege nicht von Bedeutung.
Das Beiseilen wird in der graphischen Darstellung für jedes Sortimentsstück im Einzelnen dargestellt. Dabei fließen die entsprechenden Einzelzeiten pro Sortimentsstück in die Berechnung der Arbeitszeit ein. Wird der Schlepper in Kombination mit den Arbeitssystemen Harvester oder Motormanuelle Ernte simuliert, ist es wichtig, dass bei der Einstellung der Schichten der Startzeitpunkt der Maschine entsprechend spät festgelegt wird, damit zu Beginn der Schicht auch schon eine ausreichende Anzahl von Abschnitten produziert worden ist. Hier kann man durch iterative Vorgehensweise den optimalen Startzeitpunkt herausfinden.

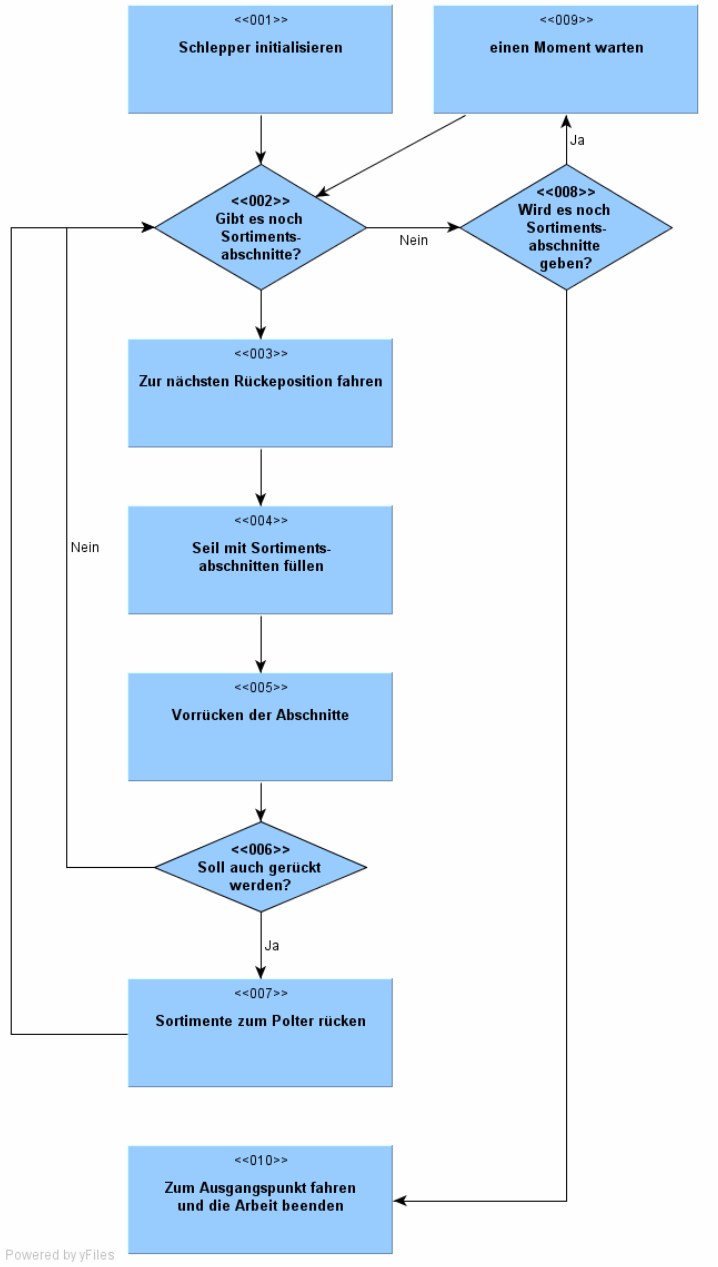


Abbildung 78: Ablaufdiagramm für das Arbeitssystem Schlepper

001: Zu Beginn des Simulationslaufs wird der Schlepper initialisiert und an einem zuvor im Modell fest definierten Startpunkt platziert.

002: Dann wird überprüft, ob sich an den Forststraßen, Rückegassen oder mitten im Bestand noch Sortimentsabschnitte befinden, die vorgerückt oder gerückt werden müssen. Ist dies nicht der Fall, geht es sofort mit Prozess **008** weiter.

003: Nun begibt sich der Schlepper zu der von ihm aus gesehen, nächstgelegenen Rückeposition. Dabei kann es sich um einen Kontrollpunkt auf einer Straße oder Gasse handeln, auf dessen Höhe im Bestand die vorzurückenden Abschnitte liegen oder aber auch um direkt am Wegesrand platzierte Stämme oder Stammabschnitte. In diesem Diagramm wird davon ausgegangen, dass der Schlepper mit dem Vorrücken von Abschnitten aus dem Bestand beginnt.

004: Das Seil des Schleppers wird ausgezogen, und die Abschnitte werden angehängt. Dieser Vorgang wird nicht graphisch dargestellt. Die Abschnitte „springen“ aus dem Bestand an die Gasse, wobei die Maschine für die errechnete Dauer dieser Arbeit an ihrer Position verweilt.

005: Die Abschnitte werden also an den Straßen- bzw. Gassenrand vorgerückt.

006: Im Anschluss wird überprüft, ob die soeben vorgerückten Abschnitte auch noch zum Polter gerückt werden sollen. Ist dies nicht gewünscht, geht es direkt mit Prozess **002** weiter.

007: Soll der Schlepper aber zusätzlich zum Vorrücken auch noch die Rückung durchführen, geschieht dies innerhalb dieses Prozesses. Die Fahrzeiten werden, wie schon bei der Motormanuellen Holzernte, mit einer vorab fest definierten Fahrgeschwindigkeit berechnet, fließen aber nicht in das Endergebnis mit ein. Sind die Abschnitte am Polter abgeladen, überprüft der Schlepper, ob noch weitere Abschnitte zu bewegen sind. Nach Ende des Rückeprozesses beginnt der Schlepper wieder bei Prozess **002**.

008: Findet der Schlepper keine weiteren Sortimentsabschnitte mehr im gesamten Bestand, prüft er, ob es überhaupt noch weitere Abschnitte in diesem Simulationslauf geben wird. Dies kann dann der Fall sein, wenn der Schlepper in Kombination mit einem Harvester oder den Waldarbeitern simuliert wird. Bei solchen Maschinenkombinationen kann es vorkommen, dass Harvester oder Waldarbeiter im weiteren Verlauf ihrer Tätigkeit wieder zusätzliche Abschnitte an den Straßen und Gassen bzw. im Bestand produzieren.

009: Daher wartet der Schlepper eine Minute ab, und beginnt dann ggf. erneut mit Prozess **002**.

010: Sind aber alle Abschnitte, die während der Holzernte produziert wurden durch den Schlepper vorgerückt und/oder zu den Poltern gerückt, begibt sich die Maschine zu ihrer Ausgangsposition und beendet damit den Simulationslauf.

5.6.4.7 Übersicht über die Eingangs-, Ausgangs- und Zustandsdaten sowie die graphische Umsetzung im Modell

Abschließend sind noch einmal alle relevanten Eingangs-, Ausgangs- und Zustandsdaten des Arbeitssystems in Abbildung 79 zusammengefasst.

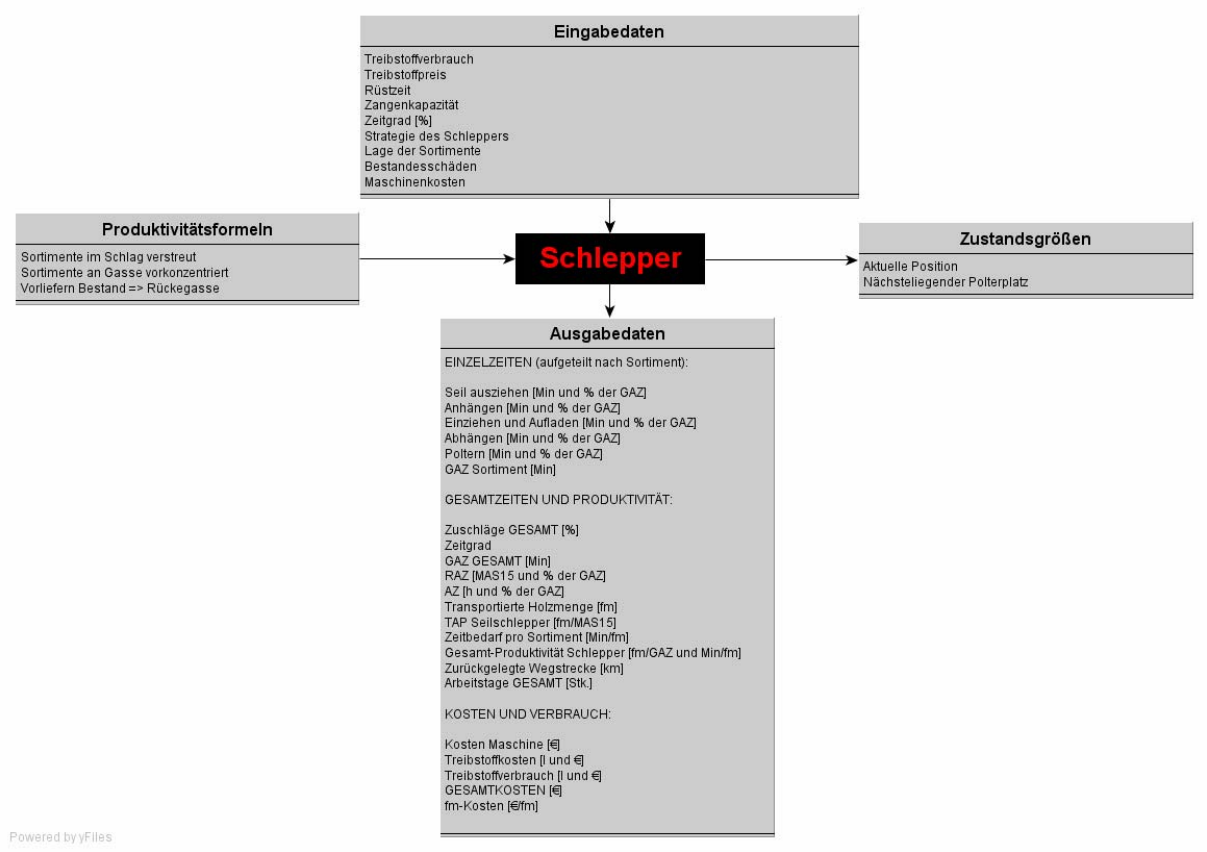


Abbildung 79: Übersicht über die Eingangs-, Ausgangs- und Zustandsdaten des Arbeitssystems Schlepper

Auch für den Schlepper wurde bei der graphischen Umsetzung ein spezielles 3D-Modell entwickelt, das der Nutzer während der gesamten Simulation in der Bestandesumgebung beobachten kann (s. Abbildung 80).

Abbildung 80: Darstellung des Schleppers im Modell

5.6.5 Das Rückepferd

Als Rückepferde bezeichnet man Pferde, die zum Holzrücken, also zum Transport im Wald gefällter und entasteter Stammabschnitte zum nächsten befahrbaren Weg verwendet werden. Im Zuge einer naturnahen Forstwirtschaft kommen Rückepferde heute wieder häufiger zum Einsatz, da sie im Gegensatz zu Maschinen kaum Bodenschäden verursachen und keine Rückegassen benötigen, sondern die Stämme auch quer durch den Bestand ziehen können (OVER, 1996).

5.6.5.1 Benutzeroberfläche und einstellbare Parameter

Im Frontend des Rückepferdes besteht die Möglichkeit, den Zeitgrad und einen Kostensatz festzulegen (s. Abbildung 81 und Tabelle 15).

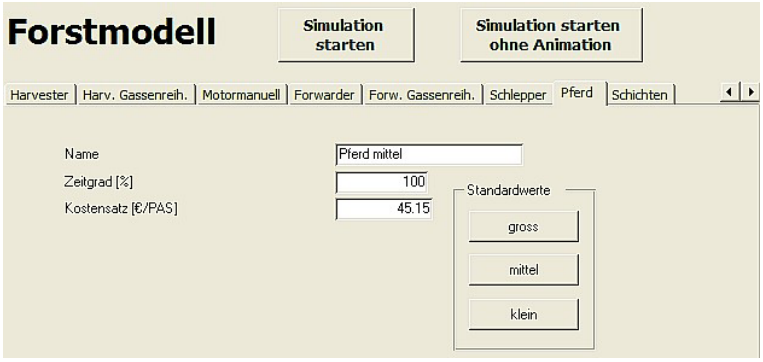


Abbildung 81: Menü des Arbeitssystems Schlepper zur Einstellung der verschiedenen Parameter

Weitere Einstellgrößen sind durch den speziellen Aufbau des zugrunde liegenden Tarifes für die Rückung mit Pferd des Landes Nordrhein-Westfalen nicht darstellbar.

Tabelle 15: Erläuterungen zu den einstellbaren Systemparametern des Systems Rückepferd

Parameter	Wert [Einheit]	Bemerkungen	Quelle
Zeitgrad	[%]	Frei wählbarer Wert	
Kostensatz	[€/PAS]	Frei wählbarer Wert; PAS = Pferdearbeitsstunde	
Zugkapazität	0.6 [fm]	Im Hintergrund der Simulation fest eingestellter Wert; nicht veränderbar; dieser Wert entspricht der maximalen Zugkraft des Pferdes.	SCHULZ, 1987

5.6.5.2 Aufbau und Einsatz der Kalkulationsformel des Tarifes für die Rückung mit Pferden

Die Voreinstellungen der einzelnen Größen im Menü des Systems, aber auch die Eigenschaften des Erschließungsnetzes und der zu rückenden Stämme und Stammabschnitte stellen Attribute dar, die das Ergebnis einer Rückepferd-Simulation entscheidend beeinflussen.
Um diese Effekte möglichst realitätsgetreu abzubilden, wurde der Tarif zur Rückung mit Pferden des Landes Nordrhein-Westfalen in das Modell integriert. Die entsprechende Formel zur Berechnung der GAZ wird in Tabelle 16 aufgeführt.

Tabelle 16: Formeln zur Berechnung der einzelnen Systemparameter

Arbeitsabschnitt	Formel	Bemerkungen	Quelle
Formeln zur Berechnung der Vorrückprozesse des Rückepferdes			
Produktivität [fm/h]	**Z * Stückmasse, mit Z = A + [B / (C + E)]**	A = 1,24 B = 1057 C = 33,35 E = Vorrückentfernung [m]	KWF, 1990

Aussagen zur Verwendung der einzelnen Systemparameter bei der Berechnung der gesuchten Zielgrößen im Modell finden sich in Anhang IX.
Die hier errechneten Werte beziehen sich auf die GAZ pro Sortimentsabschnitt. Auf diese GAZ-Werte werden im Anschluss die entsprechenden Zeitgrad-Werte angewendet. Um die RAZ zu ermitteln und die TAP (fm/PAS) berechnen zu können, muss der Wert um die Allgemeinen Zeiten reduziert werden, in diesem Fall um 20%. Dies bedeutet, dass man den errechneten fm/h-Wert wie folgt aufschlüsseln kann:

- GAZ + Zeitgrad: Gesamtdauer des Vorrückprozesses
- RAZ: errechnet sich durch die Subtraktion von 20 % des GAZ-Wertes, also durch Subtraktion der AZ
- AZ: 20 % des GAZ-Wertes

Beispiel (Stückmasse = 0,37 fm, Vorrückentfernung = 54 m):

Z = 1,24 + [1057 / (33,35 + 54 [m])] = 13,341

fm/h = Z * 0,37 [fm] = 13,341 * 0,37 [fm] = 4,94

fm/h = 4,94 fm/h
= 4,94 fm / 60 Minuten = 0,0823 fm/Min
= 0,37 fm / 0,0823 fm = 4,50 Minuten

Das Pferd benötigt also 4,50 Minuten, um einen Stammabschnitt mit einem Volumen von 0,37 fm vorzuliefern. Diese GAZ-Werte müssen für jeden einzelnen Abschnitt aufsummiert werden, um die Gesamtarbeitszeit der Vorrück-Aktion zu berechnen.
In den Einzelzeiten pro Stammabschnitt sind aber noch 20 % Allgemeine Zeiten enthalten. Die Reine Arbeitszeit beträgt also für den Stammabschnitt mit einem Volumen von 0,37 fm 3,6 Minuten. Die Reinen Arbeitszeiten pro Abschnitt können ebenfalls addiert werden und liefern in der Summe die RAZ für die komplette Operation.

Tabelle 17: Prozentwerte zur Aufschlüsselung der RAZ

Ablaufabschnitt	RÜHL, 1980	SCHULZ, 1987	Cavalli (1), 2003	Cavalli (2), 2003	Mittelwert
Leerfahrt	33 %	31 %	16 %	19 %	**25 %**
Beiziehen	4 %	2 %	1 %	1 %	**2 %**
Anhängen	5 %	32 %	17 %	14 %	**17 %**
Lastfahrt	53 %	27 %	12 %	17 %	**27 %**
Abhängen	5 %	9 %	54 %	49 %	**29 %**
RAZ [%]	100 %	100 %	100 %	100 %	**100 %**

Die erhaltene RAZ soll dann noch in die einzelnen Prozess-Abschnitte unterteilt werden. Sämtliche Teilprozesse und die dazu gehörenden Prozentwerte sind Tabelle 17 zu entnehmen. Diese Vorgehensweise ist nötig, um im Ergebnisfenster die entsprechende Dauer jedes einzelnen Arbeitsschrittes darstellen zu können. Allerdings sollen auch hier, wie beim Forstspezialschlepper, die Zeiten für Leer- und Lastfahrten nicht aufgeführt werden.
Weiterhin wird bei der Reduzierung der GAZ auf RAZ-Niveau automatisch die entsprechende Dauer der AZ ermittelt. Dieser Wert wird ebenfalls im Ergebnisfenster aufgeführt.
Zusammenfassend noch einmal das Vorgehen zur Ermittlung von GAZ, RAZ und AZ für das Pferd:

1. Berechnung der Tarif-Vorgabezeit (GAZ) für das Pferd für jedes einzelne Sortimentsstück
2. Einbeziehung des Zeitgrades => Reduzierung der GAZ
3. Aufteilung der GAZ in RAZ und AZ mit Hilfe der entsprechenden Prozentwerte

5.6.5.3 Kostensätze

Bei den Kalkulationen mit dem System Pferd wurde folgender Wert verwendet (s. Tabelle 18).

Tabelle 18: Lohnfaktoren für das Vorrücken mit Pferden

Leistung	Wert	Quelle
Kostensatz Vorrücken	45,15 €/PAS	JACKE, 2003

5.6.5.4 Systemlogik und Ablaufdiagramm

Ausgangspunkt für den Rücker und sein Pferd ist der Interaktionspunkt. Von diesem aus bewegen sich Rücker und Pferd dann zum nächstgelegenen, gefällten Baum. Ist der erste Baum bzw. die einzelnen Abschnitte, die es zu vorzurücken gilt, erreicht, werden diese am Zuggeschirr des Pferdes befestigt und bis zur Rückegasse transportiert. Dabei wird das Holz zu demjenigen Ablagepunkt gebracht, der dem jeweiligen Baum bereits vor Beginn der Simulation zugeordnet wurde. Dort angekommen wird das Holz aus dem Geschirr gelöst und abgelegt. Nun begeben sich Rücker und

Pferd wieder in den Bestand, und zwar zu denjenigen Abschnitten, die sich wiederum am nächsten zu ihrer Position befinden.

Die Abschnitte werden jeweils nur an die Forststraße oder Rückegasse befördert und dort abgelegt. Das Pferd rückt dabei alle vorhandenen Sortimente in der Reihenfolge vor, wie sie im Bestand vorliegen. Es wird nicht sortenrein vorgerückt. Die Abschnitte, die mit dem Pferd an die Gassenränder gebracht werden, können im weiteren Verlauf mit einem Schlepper oder Forwarder an die Waldstraße gefahren werden. Wurde sämtliches, im Bestand befindliches Holz an die nächstliegenden Wege und Straßen transportiert, ist die Aufgabe des Pferdes erfüllt. Rücker und Pferd begeben sich nun zurück zum Interaktionspunkt im Süden des Bestandes.

Pferd und Rücker bewegen sich frei durch den Bestand zu den entsprechenden Sortimentsabschnitten. Die Wegzeiten fließen dabei, aufgrund der Nutzung des Tarifes, nicht in die GAZ mit ein. Die Tatsache, dass sich das Pferd immer nach dem Prinzip des nächsten zu rückenden Abschnittes durch den Bestand bewegt, kann zu einer etwas unkonventionell erscheinenden Routenwahl führen. Da aber die Laufzeiten nicht extra mit in die Zeitberechnung der Simulation einfließen, sind die zum Teil „überflüssig“ erscheinenden Wege nicht von Bedeutung.

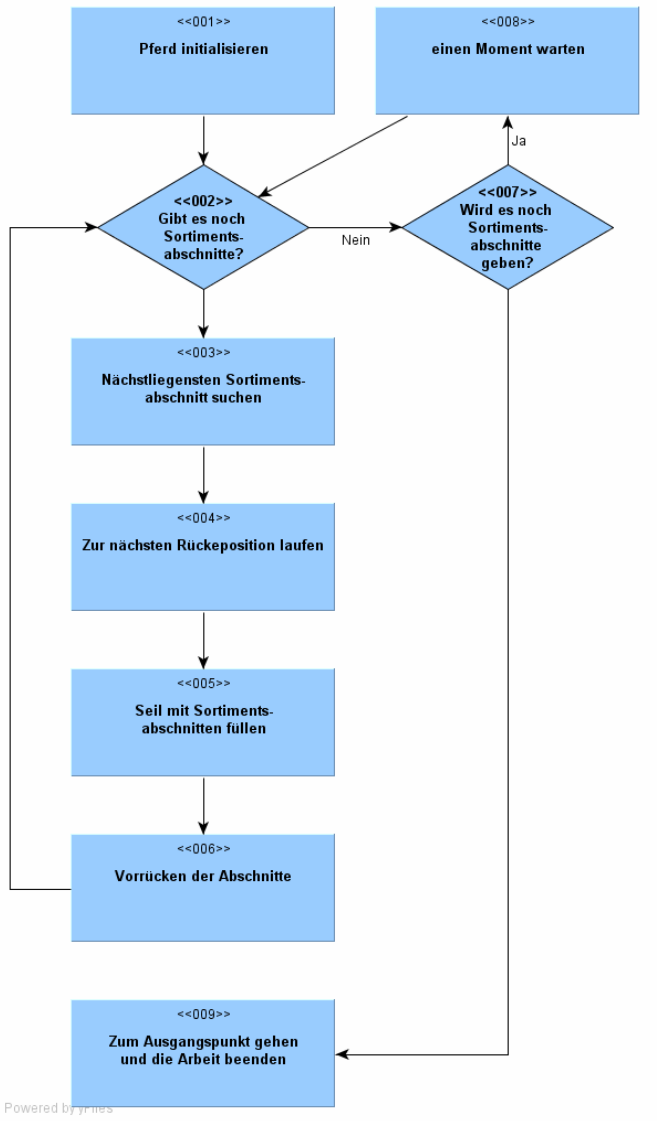


Abbildung 82: Ablaufdiagramm für das Arbeitssystem Pferd

001: Zu Beginn des Simulationslaufes wird das Pferd initialisiert und an einem zuvor im Modell fest definierten Startpunkt platziert (s. Abbildung 82).

002: Dann wird überprüft, ob sich im Bestand noch Sortimentsabschnitte befinden, die vorgerückt werden müssen. Ist dies nicht der Fall, geht es sofort mit Prozess **007** weiter.

003: Aus einer Liste wird nun das nächstliegendste Sortimentsstück ausgesucht.

004: Das Pferd begibt sich dann zu den von ihm aus gesehenen nächstgelegenen Sortimentsabschnitten. Dazu läuft es – wie die Waldarbeiter – direkt in den Bestand hinein.

005: Die Abschnitte werden an das Seil des Pferdes angehängt…

006: …und dann an den Straßen- bzw. Gassenrand gezogen. Nach der Ablage geht es wieder mit Prozess **002** weiter.

007: Findet das Pferd keine weiteren Sortimentsabschnitte mehr im gesamten Bestand, prüft es, ob es überhaupt noch weitere Abschnitte in diesem Simulationslauf geben wird. Dies kann dann der Fall sein, wenn das Pferd in Kombination mit den motormanuellen Waldarbeitern simuliert wird. Bei solchen Maschinenkombinationen kann es vorkommen, dass die Waldarbeiter im weiteren Verlauf ihrer Tätigkeit wieder zusätzliche Abschnitte im Bestand produzieren.

008: Daher wartet das Pferd eine Minute ab, und beginnt dann ggf. erneut mit Prozess **002**.

009: Sind aber alle Abschnitte, die durch die Holzernte produziert wurden durch das Pferd vorgerückt, begibt sich das Tier zu seiner Ausgangsposition und beendet damit den Simulationslauf.

5.6.5.5 Übersicht über die Eingangs-, Ausgangs- und Zustandsdaten sowie die graphische Umsetzung im Modell

Sämtliche, im Modell integrierte Eingangs-, Ausgangs- und Zustandsdaten des Arbeitssystems zeigt Abbildung 83.

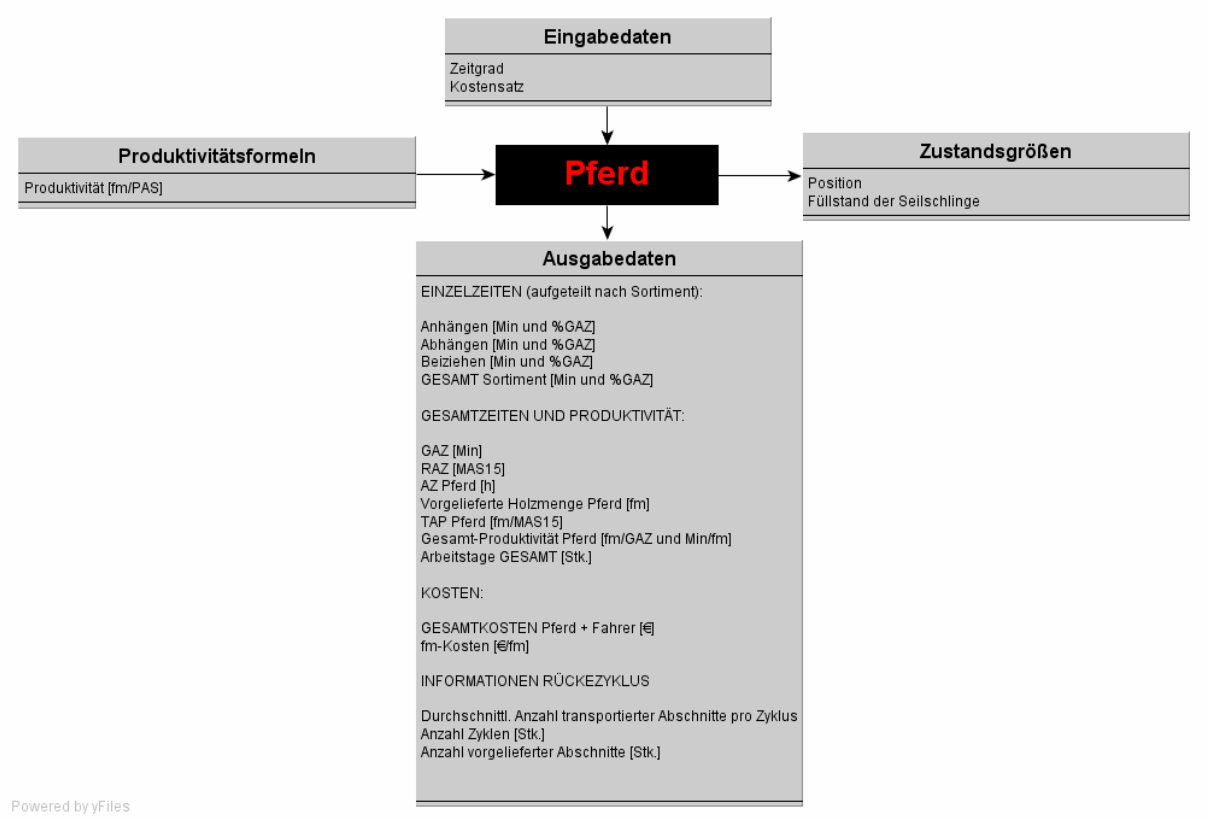


Abbildung 83: Übersicht über die Eingangs-, Ausgangs- und Zustandsdaten des Arbeitssystems Pferd

Für das Pferd wurde bei der graphischen Umsetzung ebenfalls ein spezielles 3D-Modell entwickelt, das der Nutzer während der gesamten Simulation in der Bestandesumgebung beobachten kann (s. Abbildung 84).

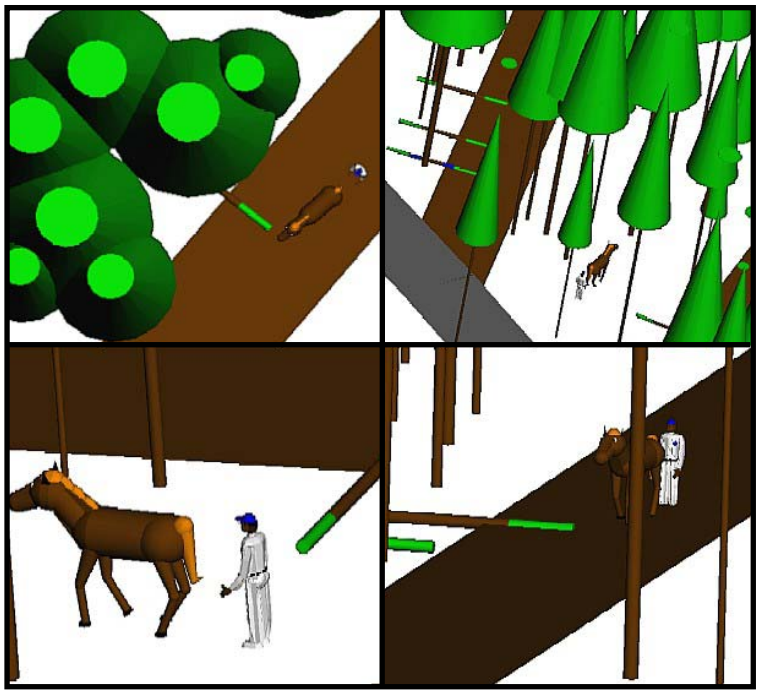


Abbildung 84: Darstellung des Pferdes im Modell

5.7 Die Maschinendatenbank

Dem aktuellen Modell hinterliegt eine so genannte Maschinendatenbank (s. Abbildung 85).

FahrzeugID	Typ	ResourcePtr	Name	Ruestzeit	Dieselpreis	Dieselverbrauch	Zeitgrad	MAS	RWS	WUS	AFS
1	Pferd	R_Pferd	Pferd mittel	0			100	100	0	0	0
3	Harvester	R_Harvester	Timberjack Dxxxx mittel	0	0.97	18	100	70	89	0	11
4	Motormanuell	R_MM	Waldarbeiter Rotte mittel	0	1.09	2	0	100	0	0	0
5	Forwarder	R_Forwarder	Forwarder 1110 D klein	0	0.97	13	100	83	85.7	0	14.3
6	Schlepper	R_Schlepper	Schlepper mittel	0	1.09	10	100	100	0	0	0
(AutoWert)				0	0	0	0	0	0	0	0

Abbildung 85: Auszug aus der Maschinendatenbank

Dort kann der Nutzer für verschiedene Systemtypen Standardwerte festlegen, die dann durch Auswahl über die Felder „Klein“, „Mittel“ und „Groß“ (s. Abbildung 86) im Frontend des jeweiligen Arbeitssystems automatisch übernommen werden. Dies erspart die stetige Neueingabe bzw. die Veränderung jedes einzelnen Parameters. Die Bezeichnungen „Klein“, „Mittel“ und „Groß“ wurden gewählt, um die unterschiedlichen Maschinen in eigene Leistungsklassen einteilen zu können.

Abbildung 86: Auswahl der entsprechenden Maschine bzw. der vorab definierten Systemparameter im Frontend der Arbeitssysteme

5.8 Die Polter

Wie bereits erwähnt, ist es möglich, einzelne Polter zu deaktivieren, sie also aus der Nutzung zu nehmen. Das Holz wird dann entsprechend auf die anderen Polter verteilt. Die Ausgabe folgender Ergebnisgrößen wird im Modell für die Polter wie folgt aufgeführt (s. Abbildung 87):

Polter Daten Hauptmenu

Anzahl Baeume	9697	[Stk]		
Anzahl Entnahme	2232	[Stk]	23.02%	[%]
Anzahl Entnahme auf Rueckegasse	0	[Stk]	0.00%	[%]
Anzahl auf Rueckegasse	0	[Stk]	0.00%	[%]

Polter 1 LosNummer	[fm]	[Stk]
1	284.3	1582
2	77.6	816
3	44.84	693
4	74.53	2360
5	0	0

Polter 2 LosNummer	[fm]	[Stk]
1	152.7	848
2	41.67	453
3	24.75	373
4	40.32	1257
5	0	0

Polter 1 Sortiment	[fm]	[Stk]
L0 (alles bis 10 cm)	3.93	240
L1a (10-14 cm)	72.25	2339
L1b (15-19 cm)	161.92	1641
L2a (20-24 cm)	134.48	834
L2b (25-29 cm)	67.48	279
L3a (30-34 cm)	30.13	90
L3b (35-39 cm)	9.19	23
L4 (40-49 cm)	1.9	5
L5 (50-59 cm)	0	0
L6 (60 cm und mehr)	0	0

Polter 2 Sortiment	[fm]	[Stk]
L0 (alles bis 10 cm)	2.11	127
L1a (10-14 cm)	38.66	1245
L1b (15-19 cm)	86.42	888
L2a (20-24 cm)	72	455
L2b (25-29 cm)	36.62	149
L3a (30-34 cm)	18.98	53
L3b (35-39 cm)	4.28	13
L4 (40-49 cm)	0.36	1
L5 (50-59 cm)	0	0
L6 (60 cm und mehr)	0	0

Abbildung 87: Auszug aus der Ergebnisübersicht für die einzelnen Polter

6 Verifizierung der Systemfunktionen

Das Forstmodell konnte nach dem in Kapitel 5 beschriebenen Bauplan entwickelt werden, wobei es in Zusammenarbeit mit der Firma SimPlan gelang, alle gewünschten Funktionalitäten hinsichtlich Erschließungssystem, Bestand und Arbeitssystemen zu integrieren.
Doch welche Möglichkeiten besitzt das Modell in seinem aktuellen Zustand? Ist es tatsächlich in der Lage, forstliche Strukturen und Abläufe der Holzernte realitätsgetreu darzustellen? Welche Optionen stehen dem potenziellen Anwender zur Verfügung?
Die oben aufgeführten Fragestellungen skizzieren im Wesentlichen den Wunsch, sicher zu stellen, dass die abgebildeten Arbeitssysteme ordnungsgemäß „funktionieren“. Man kann diesen Arbeitsschritt auch als Verifizierung bezeichnen. Zum anderen aber gilt es, zu prüfen, wie das Modell insgesamt arbeitet, und wie das Zusammenspiel aus Wegenetz, Baumbestand und simulierter Holzernte abläuft. Diesen Fragen wird in Kapitel 7 ff. nachgegangen.

Bei der Verifizierung der Modellfunktionen werden meist einfache Experimente durchgeführt, die zeigen sollen, ob sich das Modell plausibel verhält. Dabei geht es um die Überprüfung des Systemverhaltens wie z.B. der Routenwahl der Maschinen oder die korrekte Berechnung der Modellzeiten. Die System-Verifizierung wird in einem eigens dafür angelegten Modell durchgeführt. Dieses Modell simuliert aus Gründen der Übersichtlichkeit lediglich die Ernte bzw. Rückung eines einzigen Baumes. Dabei werden sowohl für jeden Arbeitsschritt Vorgabezeiten mit Hilfe der jeweiligen Formeln und Tarife berechnet, die dann den während der Simulation verbrauchten Zeiten gegenüber gestellt werden, als auch die einzelnen, im Frontend durch den Nutzer einstellbaren Parameter (z.B. Fahrgeschwindigkeiten auf unterschiedlichen Straßen und Gassen) durch Veränderung in ihren Auswirkungen überprüft.

Im Folgenden werden nun die einzelnen Funktionen der fünf Arbeitssysteme in tabellarischer Form auf ihre Richtigkeit hin untersucht. Diese Form der Darstellung ist kurz gehalten, um dem Leser einen besseren Überblick zu ermöglichen, wobei auf der linken Seite einer Tabelle die mit Hilfe der Formeln „auf dem Papier“ berechneten Vorgabezeiten stehen, während auf der rechten Seite die Werte der am Bildschirm gemessenen, tatsächlich in der Simulation verbrauchten Zeiten präsentiert werden.

6.1 Harvester

Parameter

System: 1 Harvester
Baumnummer: 490
Baumart: Fichte
BHD: 24.6
Höhe: 18.8
Sortimente:

HKS-Sorte	HKS-Klasse	HKS-Güte	Mdm	Länge	Vol. m.R.	Vol. o.R.
STH	L1b2[32]	B	19.84866	6	0.2096877	0.185654
STH	L1b1[33]	CGW[34]	16.18227	4	0.09351522	0.082268
IL	IL	IN	12.05812	4	0.05263507	0.045678

Tabelle 19: Vergleich der aus den Formeln errechneten Werte, mit den tatsächlich im Modell verbrauchten Zeiten (Harvester)

Arbeitsabschnitt	Vorgabezeit (Formel) [Sek]	Tatsächlich verbrauchte Zeit [Sek] (händisch gemessen)
Arm positionieren	30.9	30.9 bei Zufallszahl = 0.888
Fällschnitt	1.9	1.9
Fällen/Vorliefern	5.5	5.5
Vorschub	3.6	3.6
Trennschnitt	0.7	0.7
Vorschub	2.9	2.9
Trennschnitt	0.6	0.6
Vorschub	2.7	2.7
Trennschnitt	0.4	0.4
RAZ	**49.2**	**49.2**

Tabelle 20: Vergleich der Fahrgeschwindigkeiten (Harvester)

Arbeitsabschnitt	Vorgabegeschwindigkeit [km/h]	Tatsächlich gefahrene Geschwindigkeit [km/h]
Fahren auf RG	0.8	0.8
Fahren auf FS	10.0	10.0

Tabelle 21: Vergleich der aus dem Tarif errechneten Werte, mit den tatsächlich im Modell verbrauchten Zeiten bei Änderung des Zeitgrades auf 50 % (Harvester)

Zeitart	Vorgabezeit (Formeln) [Min]	Tatsächlich verbrauchte Zeit [Min]
RAZ	74.4	74.4

[32] Bezeichnung nach Mittenstärkensortierung der HKS für Stammabschnitte mit einem Mittendurchmesser von 17 bis 19 cm
[33] Bezeichnung nach Mittenstärkensortierung der HKS für Stammabschnitte mit einem Mittendurchmesser von 15 bis 16 cm
[34] Qualitätsbezeichnung nach Gütesortierung der HKS (Holz, das wegen seiner Fehler nicht in die Güteklassen A/EWG oder B/EWG aufgenommen werden kann, jedoch gewerblich verwendbar ist.)

Tabelle 22: Vergleich weiterer Parameter (Harvester)

	Vorgabewert	Simulationsergebnis
Geerntete Masse [fm]	0.36	0.36

- Änderung Fahrgeschwindigkeit auf Rückegasse: funktioniert ordnungsgemäß
- Änderung Fahrgeschwindigkeit auf Forststraße: funktioniert ordnungsgemäß
- Änderung Verbrauch: funktioniert ordnungsgemäß
- Änderung Dieselpreis: funktioniert ordnungsgemäß
- Änderung Schichtbeginn: funktioniert ordnungsgemäß
- Änderung Rüstzeit: funktioniert ordnungsgemäß
- Änderung Kranreichweite: funktioniert ordnungsgemäß
- Änderung minimaler/maximaler Erntedurchmesser: funktioniert ordnungsgemäß
- Vorgegebene Gassenreihenfolge wird eingehalten

Tabelle 23: Verhältnis RAZ:AZ bei Simulation der Ernte im Gesamtbestand (Harvester)

	Vorgabewert	Simulationsergebnis
Verhältnis RAZ:AZ (Simulation Gesamtbestand)	60 % : 40 %	58.24 % : 41.76 %

Die beobachtete Abweichung beim Verhältnis von RAZ zu AZ wird in Kapitel 7.1.3 näher erläutert.

6.2 Motormanuelle Holzernte

Parameter

System: 1 Waldarbeiter
Baumnummer: 490
Baumart: Fichte
BHD: 24.6
Höhe: 18.8
Sortimente:

HKS-Sorte	HKS-Klasse	HKS-Güte	Mdm	Länge	Vol. m.R.	Vol. o.R.
STH	L1b2	B	19.84866	6	0.2096877	0.185654
STH	L1b1	CGW	16.18227	4	0.09351522	0.082268
IL	IL	IN	12.05812	4	0.05263507	0.045678

Tabelle 24: Vergleich der aus dem Tarif errechneten Werte, mit den tatsächlich im Modell verbrauchten Zeiten (Motormanuell)

Sortimente	Vorgabezeit GAZ Waldarbeiter (Tarif) [Min]	Tatsächlich verbrauchte Zeit GAZ Waldarbeiter [Min]
L1b2	8.54	8.54
L1b1	4.44	4.44
IL	4.66	4.66

Für die Allgemeinen Zeiten wurde die Voreinstellung festgelegt, dass sie 25 % der GAZ-Dauer betragen. Dieser Wert wird mit einer tatsächlichen Größe von 24,49 % eingehalten.

Tabelle 25: Vergleich der aus dem Tarif errechneten Werte, mit den tatsächlich im Modell verbrauchten Zeiten (Motormanuell)

Sortimente	Vorgabezeit GAZ Motorsäge (Tarif) [Min]	Tatsächlich errechnete Zeit GAZ Motorsäge [Min]
L1b2	3.34	3.34
L1b1	1.89	1.89
IL	1.74	1.74

Tabelle 26: Vergleich der aus dem Tarif errechneten Werte, mit den tatsächlich im Modell verbrauchten Zeiten (Motormanuell)

Zeitart	Vorgabezeit GAZ (Tarif) [Min]	Tatsächlich verbrauchte Zeit GAZ [Min]
GAZ	17.64	17.64
RAZ	13.32	13.32
AZ	4.32	4.32

Tabelle 27: Vergleich der aus dem Tarif errechneten Werte, mit den tatsächlich im Modell verbrauchten Zeiten bei Änderung des Zeitgrades auf 50 % (Motormanuell)

Zeitart	Vorgabezeit (Tarif) [Min]	Tatsächlich verbrauchte Zeit [Min]
GAZ	26.46	26.46
RAZ	19.98	19.98
AZ	6.48	6.48

Tabelle 28: Vergleich weiterer Parameter (Motormanuell)

	Vorgabewert	Simulationsergebnis
Vorgerückte Masse [fm]	0.36	0.36
Vorgerückte Stückzahl [Stk.]	3	3
Anzahl Zyklen	1	1
Gesamtkosten [€]	4.28	4.28

- Änderung Zuschläge: funktioniert ordnungsgemäß
- Änderung Zeitgrad: funktioniert ordnungsgemäß
- Änderung Verbrauch + Kosten Treibstoff/Schmiermittel: funktioniert ordnungsgemäß

6.3 Forwarder

Parameter

System: 1 Forwarder
Baumnummer: 490
Baumart: Fichte
BHD: 24.6
Höhe: 18.8
Sortimente:

HKS-Sorte	HKS-Klasse	HKS-Güte	Mdm	Länge	Vol. m.R.	Vol. o.R.
STH	L1b2	B	19.84866	6	0.2096877	0.185654
STH	L1b1	CGW	16.18227	4	0.09351522	0.082268
IL	IL	IN	12.05812	4	0.05263507	0.045678

Tabelle 29: Vergleich der aus den Formeln errechneten Werte, mit den tatsächlich im Modell verbrauchten Zeiten (Forwarder)

Arbeitsabschnitt	Vorgabezeit (Formel) [Sek]	Tatsächlich verbrauchte Zeit [Sek] (händisch gemessen)
Beladen Sortiment 1	17.0	17.0
Beladen Sortiment 2	15.7	15.7
Beladen Sortiment 3	14.8	14.8
Entladen Sortiment 1	5.1	10.6
Entladen Sortiment 2	3.1	
Entladen Sortiment 3	2.4	
RAZ	**58.1**	**58.1**

Tabelle 30: Vergleich der Fahrgeschwindigkeiten (Forwarder)

Arbeitsabschnitt	Vorgabegeschwindigkeit [km/h]	Tatsächlich gefahrene Geschwindigkeit [km/h]
Fahren auf RG unbeladen	4.1	4.1
Fahren auf RG beladen	3.9	3.9
Fahren auf FS unbeladen	7.8	7.8
Fahren auf FS beladen	6.8	6.8
Arbeitsfahrt	3.0	3.0

Tabelle 31: Vergleich der aus dem Tarif errechneten Werte, mit den tatsächlich im Modell verbrauchten Zeiten bei Änderung des Zeitgrades auf 50 % (Forwarder)

Zeitart	Vorgabezeit (Tarif) [Min]	Tatsächlich verbrauchte Zeit [Min]
RAZ	11.21	11.21

Tabelle 32: Vergleich weiterer Parameter (Forwarder)

	Vorgabewert	Simulationsergebnis
Vorgerückte Masse [fm]	0.36	0.36
Vorgerückte Stückzahl [Stk.]	3	3
Anzahl Zyklen	1	1
Gesamtkosten (Voreinstellung: 150 €/MAS)	6.98	6.98

- Änderung Verbrauch: funktioniert ordnungsgemäß
- Änderung Dieselpreis: funktioniert ordnungsgemäß
- Änderung Schichtbeginn: funktioniert ordnungsgemäß
- Änderung Rüstzeit: funktioniert ordnungsgemäß
- Änderung Kranreichweite: funktioniert ordnungsgemäß
- Vorgegebene Gassenreihenfolge wird eingehalten

Tabelle 33: Verhältnis RAZ:AZ bei Simulation der Ernte im Gesamtbestand (Forwarder)

	Vorgabewert	Simulationsergebnis
Verhältnis RAZ:AZ (Simulation Gesamtbestand)	60 % : 40 %	59.67 % : 40.33 %

Die beobachtete Abweichung beim Verhältnis von RAZ zu AZ wird in Kapitel 7.1.3 näher erläutert.

6.4 Schlepper

Parameter

System: 1 Schlepper
Baumnummer: 490
Baumart: Fichte
BHD: 24.6
Höhe: 18.8
Sortimente:

HKS-Sorte	HKS-Klasse	HKS-Güte	Mdm	Länge	Vol. o.R.
STH	L1b2	B	19.84866	6	0.185654
STH	L1b1	CGW	16.18227	4	0.082268
IL	IL	IN	12.05812	4	0.045678

Versuch 1 (Strategie: Rücken, Lage der Sortimente: konzentriert)

Tabelle 34: Vergleich der aus dem Tarif errechneten Werte, mit den tatsächlich im Modell verbrauchten Zeiten (Schlepper)

Sortimente	Vorgabezeit GAZ Schlepper (Tarif) [Min]	Tatsächlich verbrauchte Zeit GAZ Schlepper ohne Laufzeit [Min]
L1b2	1.46	1.46
L1b1	0.83	0.83
IL	0.55	0.55

Die errechnete Vorgabe-GAZ wird während der Simulation mit Hilfe fest definierter Prozentwerte auf die einzelnen Arbeitsabschnitte verteilt. In der Summe stimmen diese Zeiten dann aber mit den Vorgabezeiten überein.
Für die Allgemeinen Zeiten wurde als Voreinstellung festgelegt, dass sie 20 % der GAZ-Dauer betragen. Dieser Wert wird mit einer tatsächlichen Größe von 20,14 % eingehalten.

Tabelle 35: Vergleich der aus dem Tarif errechneten Werte, mit den tatsächlich im Modell verbrauchten Zeiten (Schlepper)

Zeitart	Vorgabezeit (Tarif) [Min]	Tatsächlich verbrauchte Zeit [Min]
GAZ	2.83	2.83
RAZ	2.27	2.27
AZ	0.57	0.57

Tabelle 36: Vergleich der aus dem Tarif errechneten Werte, mit den tatsächlich im Modell verbrauchten Zeiten bei Änderung des Zeitgrades auf 50 % (Schlepper)

Zeitart	Vorgabezeit (Tarif) [Min]	Tatsächlich verbrauchte Zeit [Min]
GAZ	4.25	4.25
RAZ	3.40	3.40
AZ	0.85	0.85

Tabelle 37: Vergleich weiterer Parameter (Schlepper)

	Vorgabewert	Simulationsergebnis
Gerückte Masse [fm]	0.36	0.36
Gerückte Stückzahl [Stk.]	3	3
Anzahl Zyklen	1	1
Gesamtkosten (bei 150 €/MAS und 0.87 €/l) [€]	6.68	6.68

- Änderung Zuschläge: funktioniert ordnungsgemäß
- Änderung Zeitgrad: funktioniert ordnungsgemäß
- Änderung Verbrauch + Kosten Treibstoff: funktioniert ordnungsgemäß

Versuch 2 (Strategie: Rücken, Lage der Sortimente: verstreut)

HKS-Sorte	HKS-Klasse	HKS-Güte	Mdm	Länge	Vol. o.R.
STH	L1b2	B	19.84866	6	0.185654
STH	L1b1	CGW	16.18227	4	0.082268
IL	IL	IN	12.05812	4	0.045678

Tabelle 38: Vergleich der aus dem Tarif errechneten Werte, mit den tatsächlich im Modell verbrauchten Zeiten (Schlepper)

Sortimente	Vorgabezeit GAZ Schlepper (Tarif) [Min]	Tatsächlich verbrauchte Zeit GAZ Schlepper ohne Laufzeit [Min]
L1b2	2.26	2.26
L1b1	1.27	1.27
IL	0.82	0.82

Für die Allgemeinen Zeiten wurde die Voreinstellung festgelegt, dass sie 20 % der GAZ-Dauer betragen. Dieser Wert wird mit einer tatsächlichen Größe von 20,00 % eingehalten.

Tabelle 39: Vergleich der aus dem Tarif errechneten Werte, mit den tatsächlich im Modell verbrauchten Zeiten (Schlepper)

Zeitart	Vorgabezeit (Tarif) [Min]	Tatsächlich verbrauchte Zeit ohne Laufzeit [Min]
GAZ	4.35	4.35
RAZ	3.48	3.48
AZ	0.87	0.87

Tabelle 40: Vergleich der aus dem Tarif errechneten Werte, mit den tatsächlich im Modell verbrauchten Zeiten bei Änderung des Zeitgrades auf 50 % (Schlepper)

Zeitart	Vorgabezeit (Tarif) [Min]	Tatsächlich verbrauchte Zeit [Min]
GAZ	6.53	6.53
RAZ	5.22	5.22
AZ	1.31	1.31

Tabelle 41: Vergleich weiterer Parameter (Schlepper)

	Vorgabewert	Simulationsergebnis
Gerückte Masse [fm]	0.36	0.36
Gerückte Stückzahl [Stk.]	3	3
Anzahl Zyklen	1	1
Gesamtkosten (bei 150 €/MAS und 0.87 €/l) [€]	9.33	9.33

Versuch 3 (Strategie: Vorrücken, Lage der Sortimente: verstreut)

HKS-Sorte	HKS-Klasse	HKS-Güte	Mdm	Länge	Vol. o.R.
STH	L1b2	B	19.84866	6	0.185654
STH	L1b1	CGW	16.18227	4	0.082268
IL	IL	IN	12.05812	4	0.045678

Tabelle 42: Vergleich der aus dem Tarif errechneten Werte, mit den tatsächlich im Modell verbrauchten Zeiten (Schlepper)

Sortimente	Vorgabezeit GAZ Schlepper (Tarif) [Min]	Tatsächlich verbrauchte Zeit GAZ Schlepper ohne Laufzeit [Min]
L1b2	0.8	0.8
L1b1	0.44	0.44
IL	0.28	0.28

Für die Allgemeinen Zeiten wurde die Voreinstellung festgelegt, dass sie 20 % der GAZ-Dauer betragen. Dieser Wert wird mit einer tatsächlichen Größe von 19,87 % eingehalten.

Tabelle 43: Vergleich der aus dem Tarif errechneten Werte, mit den tatsächlich im Modell verbrauchten Zeiten (Schlepper)

Zeitart	Vorgabezeit (Tarif) [Min]	Tatsächlich verbrauchte Zeit ohne Laufzeit [Min]
GAZ	1.52	1.52
RAZ	1.22	1.22
AZ	0.3	0.3

Tabelle 44: Vergleich der aus dem Tarif errechneten Werte, mit den tatsächlich im Modell verbrauchten Zeiten bei Änderung des Zeitgrades auf 50 % (Schlepper)

Zeitart	Vorgabezeit (Tarif) [Min]	Tatsächlich verbrauchte Zeit [Min]
GAZ	2.28	2.28
RAZ	1.83	1.83
AZ	0.45	0.45

Tabelle 45: Vergleich weiterer Parameter (Schlepper)

	Vorgabewert	Simulationsergebnis
Gerückte Masse [fm]	0.36	0.36
Gerückte Stückzahl [Stk.]	3	3
Anzahl Zyklen	1	1
Gesamtkosten (bei 150 €/MAS und 0.87 €/l) [€]	3.24	3.24

6.5 Pferd

Parameter

System: 1 Pferd
Baumnummer: 490
Baumart: Fichte
BHD: 24.6
Höhe: 18.8
Sortimente:

HKS-Sorte	HKS-Klasse	HKS-Güte	Mdm	Länge	Vol. m.R.	Vol. o.R.
STH	L1b2	B	19.84866	6	0.2096877	0.185654
STH	L1b1	CGW	16.18227	4	0.09351522	0.082268
IL	IL	IN	12.05812	4	0.05263507	0.045678

Tabelle 46: Vergleich der aus dem Tarif errechneten Werte, mit den tatsächlich im Modell verbrauchten Zeiten (Pferd)

Zeitart	Vorgabezeit (Tarif) [Min]	Tatsächlich verbrauchte Zeit [Min]
GAZ	5.97	5.97
RAZ	4.78	4.78
AZ	1.19	1.19

Für die Allgemeinen Zeiten wurde die Voreinstellung festgelegt, dass sie 20 % der GAZ-Dauer betragen sollte. Dieser Wert wird mit einer tatsächlichen Größe von 20,03 % eingehalten.

Tabelle 47: Vergleich der aus dem Tarif errechneten Werte, mit den tatsächlich im Modell verbrauchten Zeiten bei Änderung des Zeitgrades auf 50 % (Pferd)

Zeitart	Vorgabezeit (Tarif) [Min]	Tatsächlich verbrauchte Zeit [Min]
GAZ	8.95	8.95
RAZ	7.16	7.16
AZ	1.79	1.79

Tabelle 48: Vergleich weiterer Parameter (Pferd)

	Vorgabewert	Simulationsergebnis
Vorgerückte Masse [fm]	0.36	0.36
Vorgerückte Stückzahl [Stk.]	3	3
Anzahl Zyklen	1	1
Gesamtkosten (Voreinstellung: 45.15 €/PAS)	4.47	4.47

Die oben dargestellten Verifizierungsergebnisse verdeutlichen, dass alle fünf Arbeitssysteme nachweislich ordnungsgemäß funktionieren. Die jeweils als Vorgabewerte bestimmten Größen werden von allen Systemen eingehalten, das Modell rechnet also wie gewünscht.
Aber wie „verhalten“ sich die Systeme bei Veränderungen hinsichtlich der Erschließungsnetze, der vorab eingestellten, individuellen Systemparameter oder der Bestandesstruktur? Antworten zu diesen Fragen geben die folgenden Kapitel.

7 Versuche mit unterschiedlichen Erschließungssystemen

Die einzelnen Arbeitssysteme sind mit der abgeschlossenen Verifizierung als voll einsatzfähig bestätigt worden. Wie aber könnte ein solcher Einsatz des Modells aussehen?
Zum einen kann die Überlegung in Betracht gezogen werden, die Arbeitssysteme bzw. die für sie geltenden Einstellungen zu variieren, denn wie wirkt sich beispielsweise eine Veränderung der Kranreichweite beim Harvester in einem bestimmten Bestand mit einem vorab festgelegten Kollektiv von Erntebäumen aus? Zum anderen erscheint es seinvoll, zu untersuchen, inwieweit ein oder mehrere neu entwickelte Erschließungssysteme die Ergebnisse der Holzerntesimulation beeinflussen.
Aus diesem Grund werden zahlreiche Versuche, die als „erweiterte Verifizierung“ betrachtet werden können, mit den fünf programmierten Arbeitssystemen durchgeführt. Dabei verändert man einerseits einen ausgewählten Teil der zur Verfügung stehenden Systemparameter, andererseits werden insgesamt drei neue Erschließungsszenarien modelliert.

Die untersuchten Systemparameter

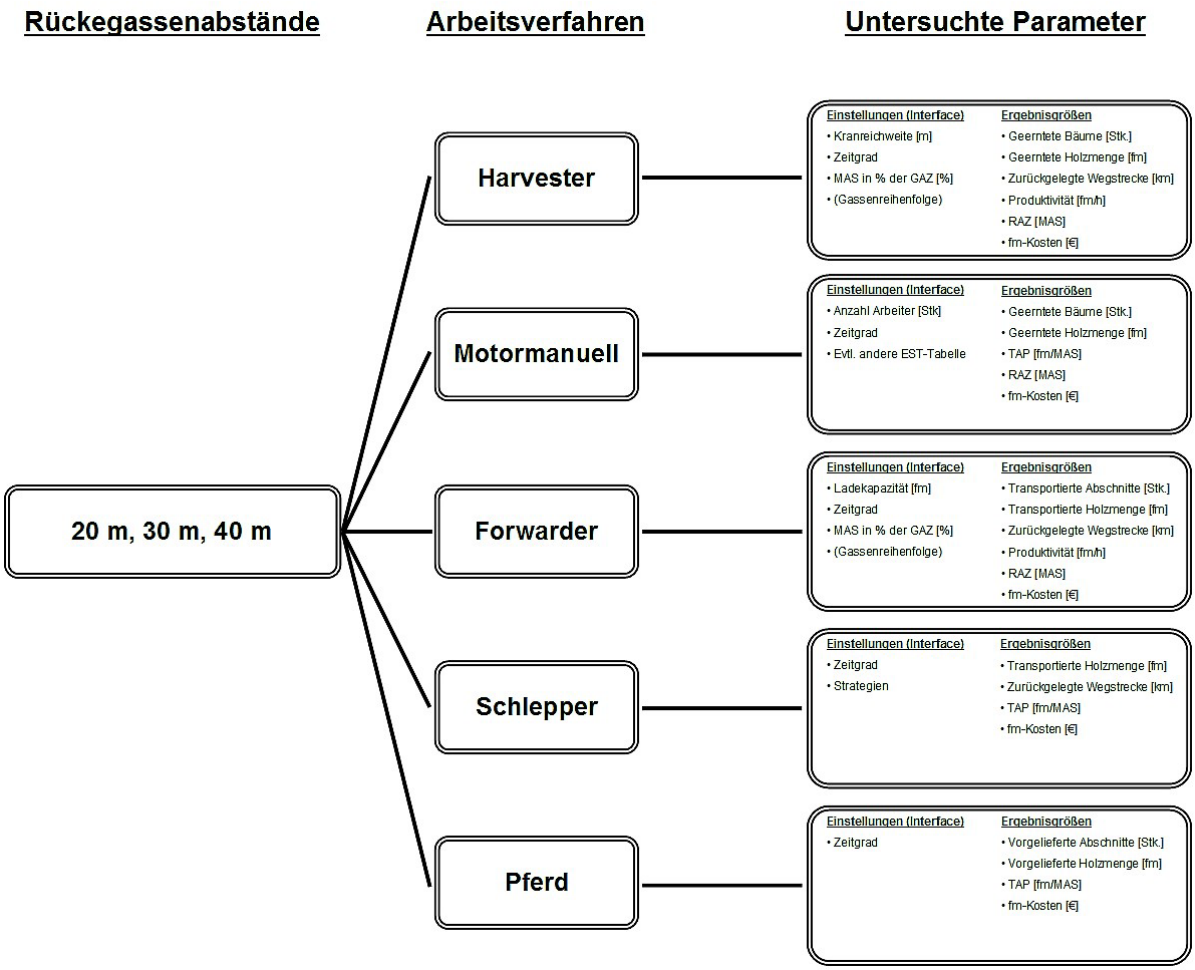


Abbildung 88: Versuchs-Anordnung für die fünf Arbeitssysteme inkl. untersuchter Parameter

Für jedes der fünf Arbeitssysteme werden mit einer Auswahl der veränderbaren Parameter Versuche durchgeführt, deren Auswirkungen im Anschluss durch die Kontrolle von ebenfalls zuvor ausgewählten Ergebnisgrößen bestimmt werden können. Um welche Parameter bzw. Ergebnisgrößen es sich dabei handelt, zeigt Abbildung 88. Die Tatsache, dass sich die Versuche nicht auf alle veränderbaren Parameter beziehen, wird damit begründet, dass es nicht für alle dieser Größen notwendig ist, sie im Einzelnen zu untersuchen. Beispielsweise ist es nicht unbedingt erforderlich, unterschiedliche Verbrauchswerte des Forwarders zu simulieren, da sich die Ergebnisse auch relativ leicht manuell berechnen lassen. Dagegen erscheint es weitaus interessanter, die Folgen einer Veränderung der Ladekapazität derselben Maschine zu beobachten.

Die Erschließungssysteme

Im Hinblick auf einen Harvestereinsatz scheint generell ein Erschließungssystem ideal zu sein, bei dem jeder Baum des Bestandes mit dem Aggregat der Maschine erreicht werden kann. Die derzeit in der Praxis eingesetzten Harvester gehen mit wenigen Ausnahmen über Reichweiten von 10 m nicht hinaus. Der ideale Gassenabstand liegt also aus Sicht der entsprechenden Einsatzleiter bei 20 m, bei engeren Abständen sind die Maschinen wegen der sinkenden Aufarbeitungsmengen in der Regel nicht mehr optimal ausgelastet (VON DER HEIDE, FRIEDEL, BOMBOSCH, 2005). Allerdings darf man neben den praxisrelevanten, auf den Ernteeinsatz bezogenen Argumenten die ökologischen, nachhaltigen und wirtschaftlich langfristig betrachteten Aspekte hinsichtlich des Flächenverbrauchs nicht außer Acht lassen. Dieser Verbrauch ist von der Gassenbreite und dem Gassenabstand abhängig. In der Praxis sind Gassen etwa 4,5 m bis 5 m breit. Die Entscheidung, den Gassenabstand von 30 m auf 20 m zu senken, steigert den Flächenverbrauch um ca. 40 % (WALDHERR, 2006). Besonders aus bodenphysikalischen Gründen erscheint es daher bedenklich, wenn bis zu 20 % der Waldbodenfläche durch das Befahren mit schweren Maschinen wie Harvester und Forwarder langfristige und zum Teil folgenreiche Veränderungen der Bodenstruktur befürchtet werden müssen. Somit ist es wichtiger Bestandteil der Erschließungsplanung, zwischen kurzfristig wirtschaftlich vorteilhaften Szenarien (intensive Feinerschließung) und den längerfristigen Auswirkungen dieser Einsätze (evtl. irreparable Bodenschäden) abzuwägen.
Eine vor Beginn des tatsächlichen Einsatzes durchgeführte Simulation könnte auf die Fragen nach der Erschließungsdichte und der notwendigen Häufigkeit der Befahrungen wichtige Antworten liefern. Daher wird die Veränderung der einzelnen Parameter aller fünf Arbeitssysteme gleichzeitig in drei unterschiedlichen Bestandesmodellen simuliert: Eines mit einem idealisierten Erschließungssystem mit einem Gassenabstand von 20 m, eines mit einem Gassenabstand von 30 m und eines mit einem Gassenabstand von 40 m (s. Abbildung 89). Die Bestandesfläche des Originalbestandes bleibt unangetastet und auch der aufstockende Bestand ist in allen drei Modellen derselbe. Veränderungen bei der Anzahl der aufstockenden Bäume sowie der Erntebäume ergeben sich allerdings durch das Wegfallen bzw. Hinzufügen einzelner Rückegassen. Ziel ist es, nachzuweisen, dass unterschiedlich strukturierte Erschließungsszenarien auch unterschiedliche Einflüsse auf die simulierten Arbeitssysteme haben, und dem Nutzer somit die Möglichkeit geben, die individuellen Eigenschaften der Wege- und Gassennetze in seine Einsatzplanung mit einzubeziehen.

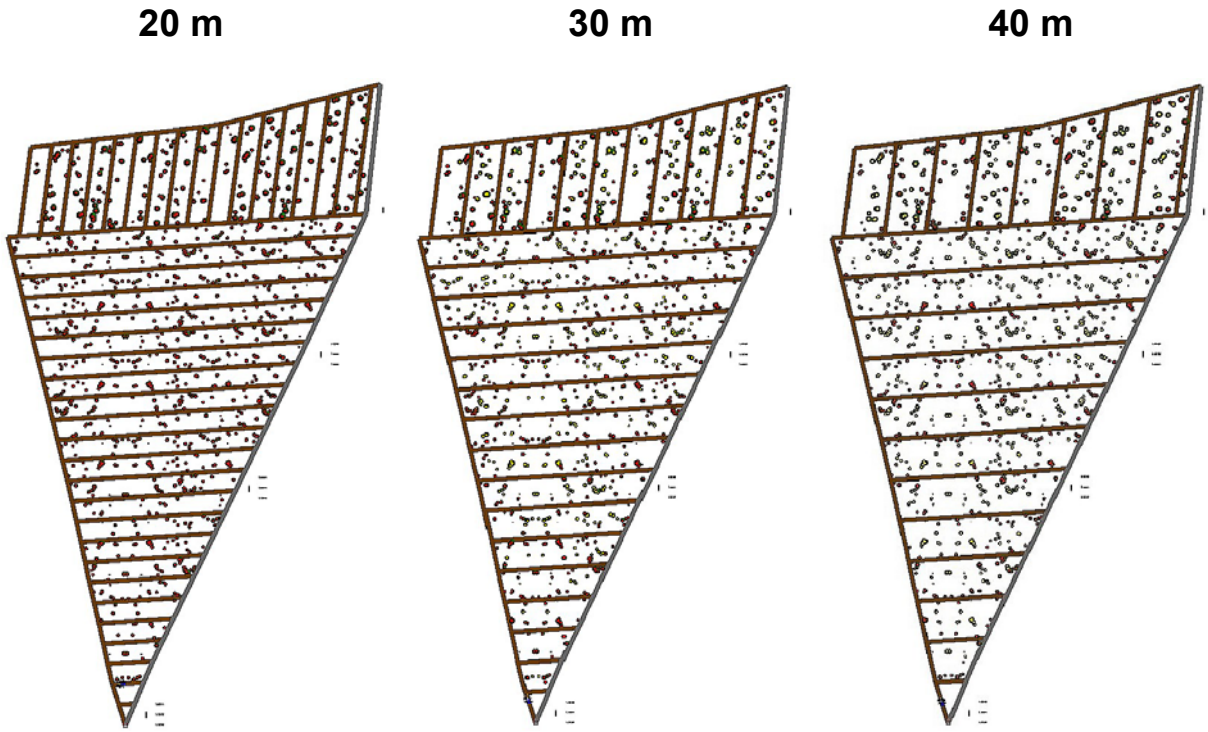


Abbildung 89: Die drei Erschließungsszenarien mit regelmäßigen Gassenabständen von 20 m, 30 m und 40 m

Charakteristika der Versuchsbestände

Tabelle 49: Bestandeskennzahlen der drei unterschiedlichen Modelle

	20 m RG-Abstand	30 m RG-Abstand	40 m RG-Abstand
Anzahl Bäume im Modell [Stk.]	9698	9690	9686
Davon Bäume auf Rückegassen und Forststraßen (werden automatisch eliminiert)	2501	1767	1454
Anzahl Bäume aufstockender Bestand [Stk.]	7331	8065	8378
Anzahl Erntebäume des aufstockenden Bestandes [Stk.]	1085	1190	1245
Anteil Erntebäume an aufstockendem Bestand [%]	14.8	14.8	14.9
Durchschnittlicher BHD aufstockender Bestand [cm]	23.8	23.8	23.8
Durchschnittliche Höhe aufstockender Bestand [m]	19.2	19.2	19.2
Durchschnittlicher BHD Erntebäume [cm]	25.8	25.8	25.8
Durchschnittliche Höhe Erntebäume [m]	19.9	20	20

Durch die Erhöhung des durchschnittlichen Gassenabstandes von 20 m über 30 m auf 40 m nimmt die Anzahl an Rückegassen und Forststraßen auf der fest definierten Bestandesfläche zwangsläufig ab (s. Tabelle 49). Dadurch wird der Anteil an unproduktiven Flächen, auf denen keine Bäume stocken, reduziert. Parallel dazu vergrößern sich die produktiven Wuchsflächen zwischen den Gassen und Straßen, auf denen dann weitere Bäume „wachsen“ können (s. auch Abbildung 89). Die Simulationssoftware ist dahingehend programmiert, dass sie diese neu hinzugekommenen Flächen nach dem Prinzip der „geklonten Quadranten“ (s. Kapitel 4.3.2.2) automatisch mit Bäumen auffüllt. Bei

einem Blick auf die Graphik in Abbildung 90 ist bei steigendem Gassenabstand eine Zunahme der Baumanzahl sowohl beim aufstockenden Bestand (insgesamt + 1047 Stück), als auch bei den Erntebäumen (+ 160 Stück) zu erkennen.

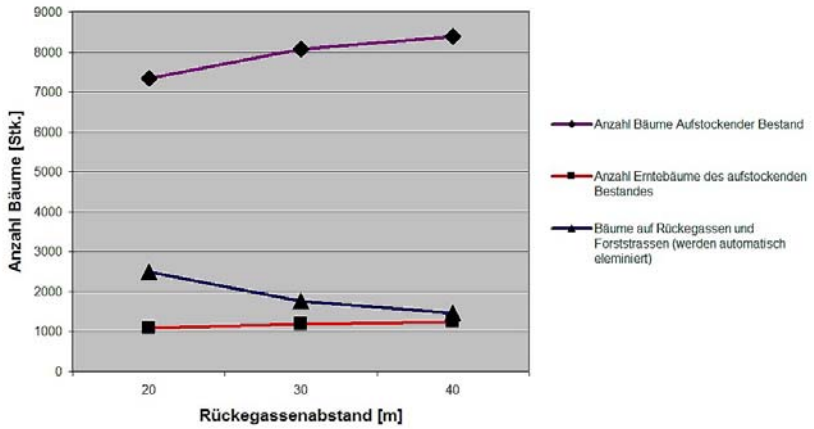


Abbildung 90: Vergleich der Anzahl an Bäumen des aufstockenden Bestandes, an Erntebäumen und an Bäumen auf Rückegassen und Forststraßen, die durch eine Ausweitung des durchschnittlichen Gassenabstandes von 20 m auf 30 m und 40 m beeinflusst werden

In Abbildung 91 wird weiterhin deutlich, dass trotz der Zunahme an Bäumen die in SILVA für diesen Bestand festgelegten Mittelwerte der wichtigen Größen „BHD“ und „Höhe“ über die drei Erschließungsszenarien hinweg nahezu unverändert bleiben. Eine „entwicklungsbezogene Verzerrung“ durch die Veränderung in der Bestandesstruktur tritt also nicht auf.

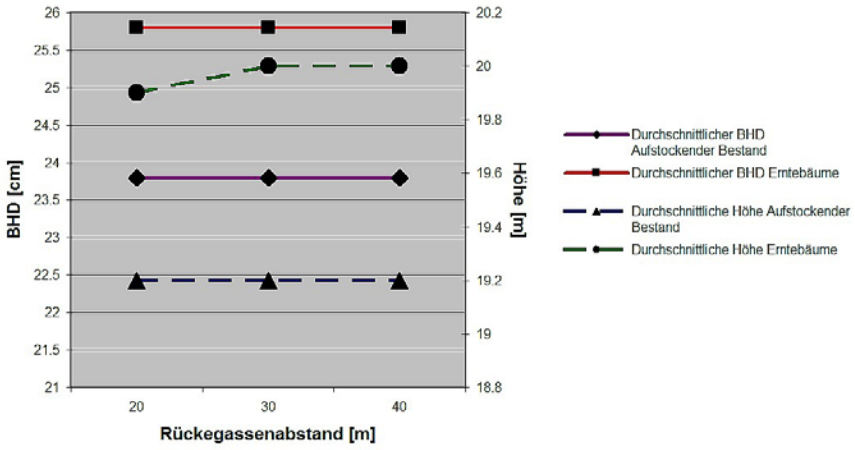


Abbildung 91: Vergleich der durchschnittlichen Brusthöhendurchmesser und der durchschnittlichen Höhen des aufstockenden Bestandes und der Erntebäume über die drei unterschiedlichen Erschließungsszenarien (20 m, 30 m und 40 m Gassenabstand) hinweg

7.1 Versuche mit dem Arbeitssystem Harvester

Im Rahmen der im Folgenden beschriebenen Versuchsreihen zum Arbeitssystem Harvester sollen einleitend einige wichtige Einfluss- und Ergebnisgrößen und ihre Beziehungen zueinander erläutert werden (s. Abbildung 92).

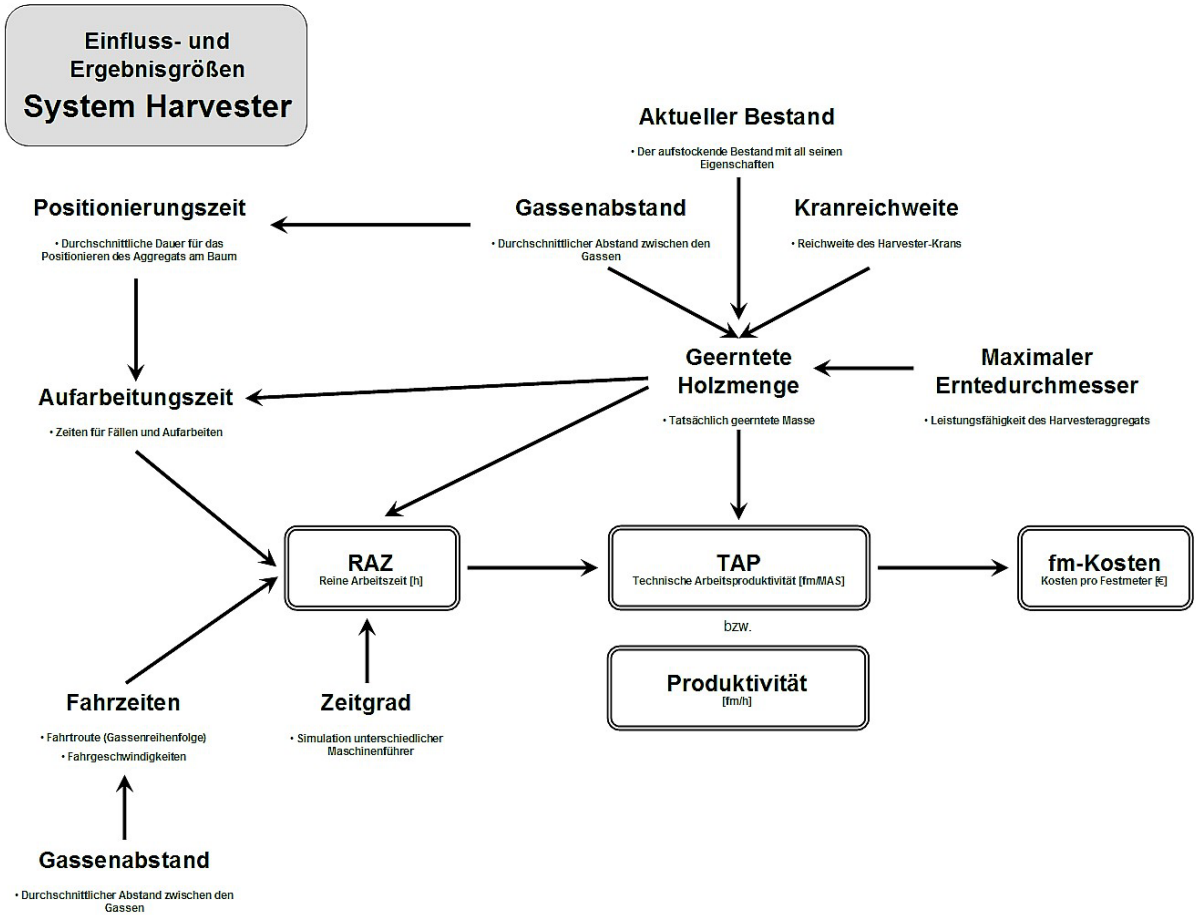


Abbildung 92: Einfluss- und Ergebnisgrößen für das System Harvester

Die für den Praktiker entscheidenden Ergebnisgrößen einer Simulation dieses Arbeitssystems sind die Reine Arbeitszeit (RAZ), die Technische Arbeitsproduktivität (TAP) bzw. die Produktivität und die Kosten pro Festmeter aufgearbeitetes Holz.

Die RAZ beschreibt hierbei die tatsächliche Arbeitszeit, also Zeit, während der der Harvester produktiv im Bestand gearbeitet hat bzw. die Zeiten, die er auf Rückegassen und Forststraßen gefahren ist. Angegeben wird diese Größe in Stunden (h).

Einfluss auf die RAZ hat der Zeitgrad (s. Kapitel 5.6.2.4). Er wirkt sich während der Simulation als Zu- oder Abschlag auf die aus den Produktivitätsformeln ermittelten Einzelzeiten aus. Der Zeitgrad ermöglicht es dem Nutzer des Modells, unterschiedliche Leistungsfähigkeiten der Maschinenführer zu simulieren.

Als weitere bedeutsame Ergebnisgröße ist die Technische Arbeitsproduktivität (TAP) zu nennen. Sie wird durch Berechnung des Quotienten aus der tatsächlich geernteten Holzmenge, angegeben in fm,

und der für diesen Eingriff aufgewendeten Reinen Arbeitszeit (RAZ), in diesem Fall angegeben in Maschinenenarbeitsstunden (MAS), ermittelt.

$$TAP = \frac{\text{Geerntete Holzmenge [fm]}}{\text{Maschinenarbeitsstunden [MAS]}}$$

Diese MAS setzen sich aus den Zeiten für das Fällen und Aufarbeiten der Bäume, den Fahrzeiten und den Unterbrechungen mit einer Dauer < 15 Minuten zusammen. Alle länger andauernden Unterbrechungen werden nach Definition den Allgemeinen Zeiten (AZ) zugeordnet und fließen somit in die Gesamtarbeitszeit (GAZ) ein, die hier aber nicht untersucht werden soll. Sie ist vielmehr von Faktoren wie Maschinenalter, Anfälligkeit für Schäden oder Unterbrechungen anderer Art abhängig.
Wie groß dabei die tatsächlich geerntete Holzmenge ausfällt, hängt zum einen von den gegebenen Verhältnissen (Alter, Bestockungsgrad, Baumartenverteilung, Durchforstungsstärke) des zu bearbeitenden Bestandes sowie der Reichweite des Harvesterkrans, gemessen von der Mitte der Rückegasse, und der Leistungsfähigkeit des Aggregats, charakterisiert durch den maximalen Durchmesser eines Erntebaumes, zum anderen aber auch von der Anordnung des Rückegassensystems ab. Entscheidend ist hier der durchschnittliche Abstand zwischen den Gassen.
Die TAP wiederum beeinflusst dann die für den Praktiker wohl wichtigste Größe, die Kosten pro geernteten Festmeter. Hierfür gilt: Je produktiver ein Arbeitssystem arbeitet, umso geringer sind die Stückkosten der Produktion. Eine hohe TAP führt demnach zu geringeren Stückkosten als eine niedrigere.
Hinzuweisen ist zusätzlich noch auf die Wechselwirkungen zwischen dem Gassenabstand und der durchschnittlichen Positionierungsdauer des Aggregats. Im weiteren Verlauf der Untersuchungen wird darauf noch näher eingegangen.
Ziel der nun folgenden Versuche ist es, diese aus der Praxis bekannten Zusammenhänge mit Hilfe verschiedener Modelle nachzuweisen. Dabei sollen unterschiedliche Einflussfaktoren des Systems Harvester verändert und die Auswirkungen auf die relevanten Ergebnisgrößen dargestellt werden.

7.1.1 Versuchsreihe 1: Auswirkungen von Veränderungen der Kranreichweite des Harvesters auf verschiedene Systemparameter bei gleichzeitiger Veränderung des Rückegassenabstandes

Auswirkungen auf die Anzahl nicht geernteter Bäume	
Ausgangssituation System Harvester	Mit Ausnahme des Parameters „Kranreichweite“ bleiben sämtliche Einstellungen für das System Harvester bei allen Simulationsläufen unverändert.
Hypothese 1	Es wird erwartet, dass eine Veränderung der Kranreichweite des Harvesters in 1-Meter-Schritten (ausgehend von 10 m Kranreichweite) in diesem Fall dazu führt, dass 1. durch eine Erhöhung der Reichweite auf bis zu 13 m mehr zu erntende Bäume von der Maschine erreicht und aufgearbeitet werden können, und dass 2. durch eine Verminderung der Reichweite auf bis zu 7 m weniger zu erntende Bäume aufgearbeitet werden können.
Hypothese 2	Im Zuge der Erhöhung der Rückegassenabstände von 20 m auf 40 m wird sich die Anzahl der zu erntenden Bäume (ohne Berücksichtigung der tatsächlichen Kranreichweite) schrittweise erhöhen, da immer weniger Rückegassen vorhanden sind, und somit mehr Wuchsfläche zur Verfügung steht.
Hypothese 3	Gleichzeitig wird die Erhöhung der Rückegassenabstände von 20 m auf 40 m dazu führen, dass insgesamt gesehen immer weniger Bäume von der Maschine erreicht werden können.

Die genauen Simulationsergebnisse sind in Anhang II aufgeführt.

Auswertung

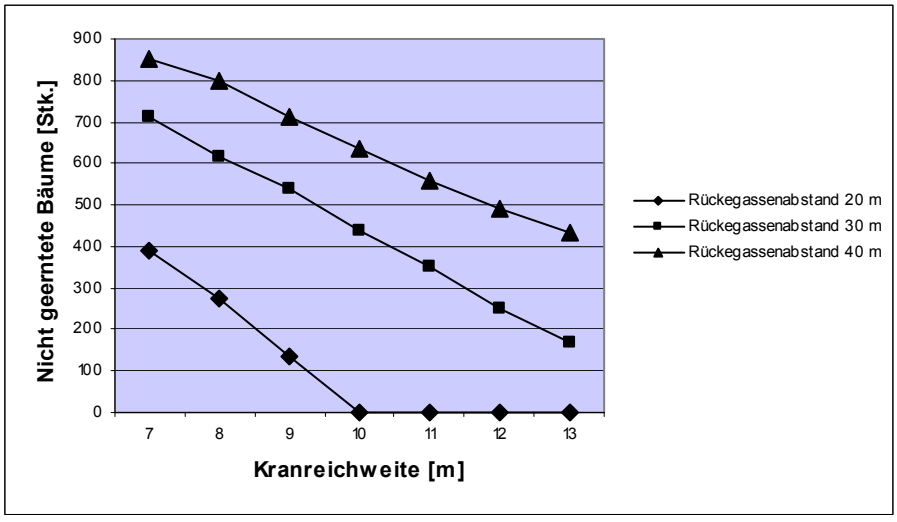


Abbildung 93: Auswirkung der Veränderung der Kranreichweite des Harvesters auf die Anzahl nicht geernteter Bäume bei gleichzeitiger Erhöhung des Rückegassenabstandes von 20 m auf 40 m

Die Ergebnisse der Simulationsläufe zeigen, dass die einzelnen Modelle in der Lage sind, die in der Versuchshypothese formulierten Erwatungen zu erfüllen. Es wird deutlich, dass die Veränderung der Kranreichweite von 7 m auf 13 m den erwarteten Effekt hat: Mit zunehmender Kranreichweite können immer mehr Erntebäume erreicht und aufgearbeitet werden bzw. es werden immer weniger Bäume

nicht erreicht (s. Abbildung 93). Befinden sich beispielsweise bei einem Gassenabstand von 30 m und einer Kranreichweite von 7 m noch 710 Erntebäume außerhalb des Einzugsgebietes der Maschine, so sind es bei einer Reichweite von 13 m nur noch 169. Dieser Effekt ist bei sämtlichen Versuchsläufen zu beobachten. Dabei ist zu beachten, dass sich der Harvester im Modell immer nur direkt auf der Rückegasse bzw. Forststraße bewegt. Ein Verlassen dieser Fahrbahnen, z.B. ein kurzes „Einbiegen“ in den Bestand, wie es in der Praxis manchmal vorkommen kann, ist nicht möglich.
Auch die zweite Hypothese kann belegt werden. Durch die Erweiterung des Gassenabstandes kommt es insgesamt zu einer Erhöhung der Erntebaumanzahl um 160 Stück (s. Tabelle 50). Diese Bäume werden im Modell automatisch an den Stellen platziert, an denen zuvor Rückegassen verlaufen sind. Die Produktionsfläche wird demnach vergrößert.

Tabelle 50: Anzahl der Erntebäume und der Bäume auf Forststraßen und Rückegassen

	20 m RG-Abstand	30 m RG-Abstand	40 m RG-Abstand
Anzahl zu entnehmender Bäume [Stk.]	1085	1190	1245
Anzahl Bäume auf den Forststraßen und Rückegassen [Stk.]	2501	1767	1454

Die Behauptung, dass die Erhöhung der Rückegassenabstände von 20 m auf 40 m dazu führen würde, dass insgesamt gesehen immer weniger Bäume von der Maschine gegriffen werden können bestätigt sich ebenfalls. Wurden zum Beispiel bei 20 m Gassenabstand und 11 m Kranreichweite noch alle zu erntenden Bäume von der Maschine erreicht, sind es bei einem Abstand von 30 m bereits 352, die nicht in Reichweite liegen, bei einer Distanz von 40 m zwischen den Gassen sogar 556. Auch dieser Effekt ist über die gesamte Versuchsreihe hinweg zu beobachten.

Auswirkungen auf die tatsächlich geerntete Holzmenge	
Ausgangssituation System Harvester	Mit Ausnahme des Parameters „Kranreichweite“ bleiben sämtliche Einstellungen bei allen Simulationsläufen unverändert.
Hypothese 1	Es wird erwartet, dass eine Veränderung der Kranreichweite des Harvesters in 1-Meter-Schritten (ausgehend von 10 m Kranreichweite) in diesem Fall dazu führt, dass 1. durch eine Erhöhung der Reichweite auf bis zu 13 m die tatsächlich geerntete Holzmenge zunimmt, und dass 2. durch eine Verminderung der Reichweite auf bis zu 7 m die tatsächlich geerntete Holzmenge abnimmt.
Hypothese 2	Im Zuge der Erhöhung der Rückegassenabstände von 20 m auf 40 m wird sich die tatsächlich geerntete Holzmenge reduzieren, da insgesamt gesehen immer weniger Bäume von der Maschine gegriffen werden können.

Auswertung

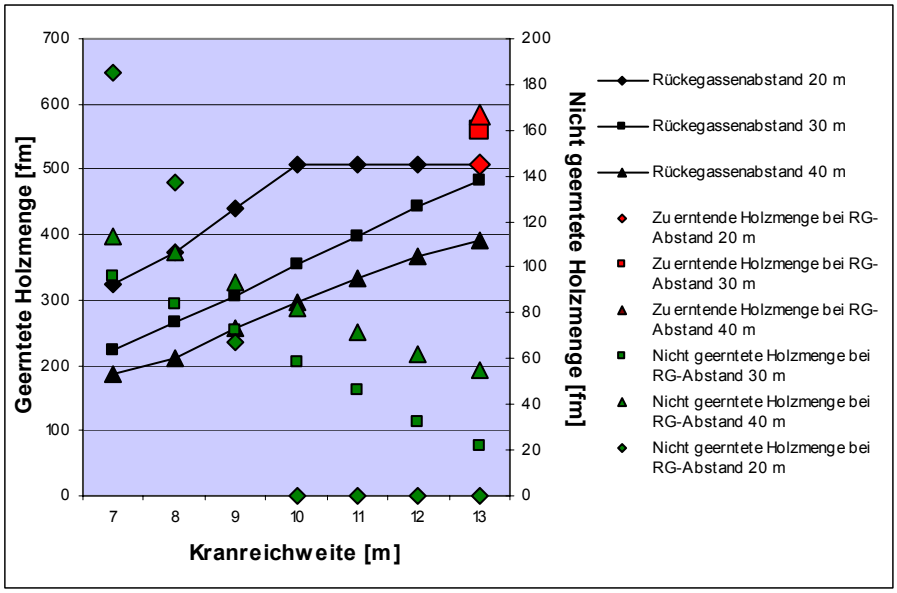


Abbildung 94: Auswirkung der Veränderung der Kranreichweite des Harvesters auf die tatsächlich geerntete Holzmenge bei gleichzeitiger Erhöhung des Rückegassenabstandes von 20 m auf 40 m

Als beobachteter Parameter wird bei dieser Versuchsreihe die tatsächlich geerntete Holzmenge, angegeben in Festmeter, betrachtet. Dabei ist zu beobachten, dass durch eine Erhöhung der Kranreichweite bei allen drei Szenarien auch die gesamte Masse der tatsächlich geernteten Bäume zunimmt (s. Abbildung 94). Dies erklärt sich damit, dass sich durch die größere Reichweite immer mehr Erntebäume im Arbeitsbereich der Maschine befinden.

Ebenso wird deutlich, dass die Ausweitung der Rückegassenabstände von 20 m auf 30 m und 40 m dazu führt, dass der Harvester mit zunehmendem Abstand nicht mehr in der Lage ist, die gewünschte Holzmenge zu ernten. Bei 40 Metern Gassenabstand und der maximalen Reichweite von 13 Metern kann die Maschine von den erwarteten 584 fm lediglich 392.4 fm ernten.

Auswirkungen auf die zurückgelegte Wegstrecke	
Ausgangssituation System Harvester	Mit Ausnahme des Parameters „Kranreichweite“ bleiben sämtliche Einstellungen bei allen Simulationsläufen unverändert.
Hypothese 1	Es wird erwartet, dass eine Veränderung der Kranreichweite des Harvesters in 1-Meter-Schritten (ausgehend von 10 m Kranreichweite) in diesem Fall dazu führt, dass 1. durch eine Erhöhung der Reichweite auf bis zu 13 m die zurückgelegte Wegstrecke der Maschine stellenweise zunehmen, und dass 2. durch eine Verminderung der Reichweite auf bis zu 7 m die zurückgelegte Wegstrecke stellenweise abnehmen kann.
Hypothese 2	Im Zuge der Erhöhung der Rückegassenabstände von 20 m auf 40 m wird sich die zurückgelegte Wegstrecke reduzieren, da insgesamt gesehen immer weniger Gassen vorhanden sind, die von der Maschine befahren werden.

Auswertung

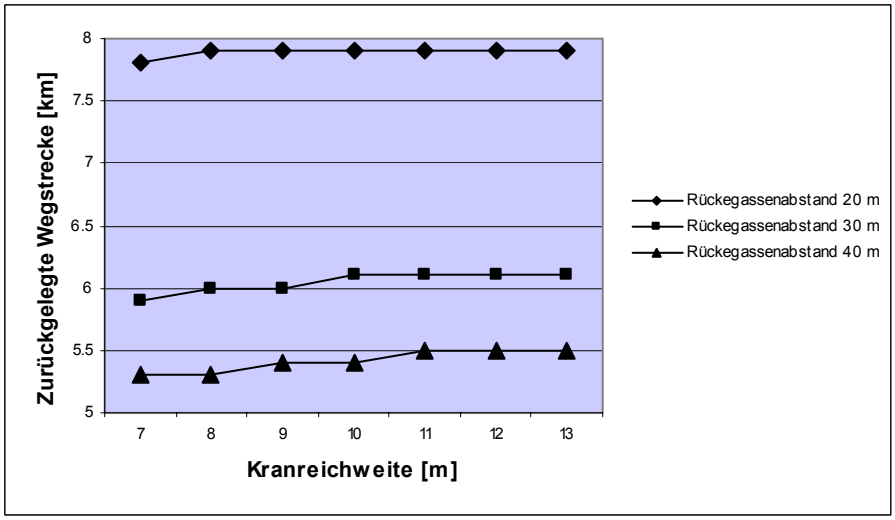


Abbildung 95: Auswirkung der Veränderung der Kranreichweite des Harvesters auf die zurückgelegte Wegstrecke bei gleichzeitiger Erhöhung des Rückegassenabstandes von 20 m auf 40 m

Eine Veränderung der Kranreichweite hat zur Folge, dass bis zu einer Reichweite von 11 m leichte Veränderungen bei der Länge der zurückgelegten Wegstrecke zu beobachten sind (s. Abbildung 95). Die größte Steigerung beträgt 0,2 km. Wie zuvor bereits dargestellt, bewirkt die geringere Kranreichweite, dass weniger Erntebäume gegriffen werden können. Dies führt dazu, dass bestimmte Gassenabschnitte nicht mehr von der Maschine befahren werden, da es dort keine Erntebäume in Reichweite mehr gibt. Ab einer Greifdistanz von maximal 11 m bleiben dann aber alle zurückgelegten Wegstrecken unverändert.

Zu betonen ist hierbei, dass die getroffenen Aussagen nur im Hinblick auf dieses spezielle Versuchsszenario gültig sind. Würden die Positionen der Erntebäume verändert werden, hätte dies ein anderes Ergebnis zur Folge, da sich die Maschine automatisch andere Fahrwege suchen würde.

Deutlich wird bei dieser Versuchsreihe auch, dass sich durch die Erhöhung der Rückegassenabstände von 20 m auf 40 m die zurückgelegte Wegstrecke reduziert. Da insgesamt gesehen immer weniger Gassen vorhanden sind, die von der Maschine befahren werden können, war dieses Ergebnis zu erwarten.

Auswirkungen auf die Reine Arbeitszeit (RAZ)	
Ausgangssituation System Harvester	Mit Ausnahme des Parameters „Kranreichweite“ bleiben sämtliche Einstellungen bei allen Simulationsläufen unverändert.
Hypothese 1	Es wird erwartet, dass eine Veränderung der Kranreichweite des Harvesters in 1-Meter-Schritten (ausgehend von 10 m Kranreichweite) in diesem Fall dazu führt, dass 1. durch eine Erhöhung der Reichweite auf bis zu 13 m die Reine Arbeitszeit [h] der Maschine zunimmt, und dass 2. durch eine Verminderung der Reichweite auf bis zu 7 m die Reine Arbeitszeit [h] abnimmt.
Hypothese 2	Im Bezug auf die Erhöhung der Rückegassenabstände von 20 m auf 40 m wird erwartet, dass die Reine Arbeitszeit schrittweise abnimmt. Diese Vermutung ergibt sich aus der Betrachtung der tatsächlich geernteten Holzmenge und der zurückgelegten Wegstrecke der Maschine. Die RAZ wird in Zeitstunden (h) ohne jede Art von Unterbrechungen angegeben.

Auswertung

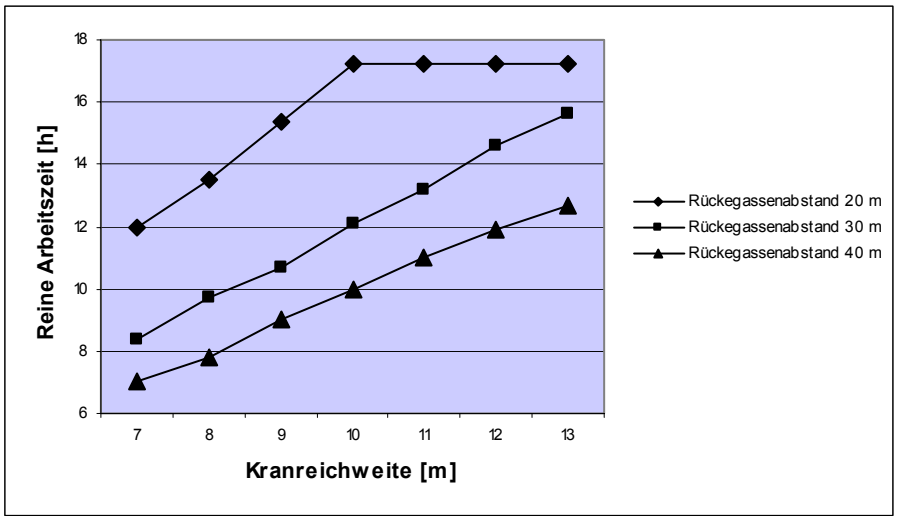


Abbildung 96: Auswirkung der Veränderung der Kranreichweite des Harvesters auf die Reine Arbeitszeit (RAZ), bei gleichzeitiger Erhöhung des Rückegassenabstandes von 20 m auf 40 m

Wie in den zu Beginn des Versuchs aufgestellten Hypothesen bereits vermutet, wird der Einfluss der tatsächlich geernteten Holzmengen und der zurückgelegten Wegstrecken auf die RAZ deutlich (s. Abbildung 96). Es ist zu erkennen, dass die RAZ in allen drei Fällen mit zunehmender Kranreichweite ansteigt. Dies erklärt sich damit, dass, unabhängig der Gassenabstände, die Erhöhung der Reichweite dazu führt, dass immer mehr Erntebäume greifbar sind.

Bei einem Rückegassenabstand von 20 m können ab einer Kranreichweite von 10 m sämtliche Erntebäume von der Maschine gefällt und aufgearbeitet werden. Dementsprechend bleibt die RAZ von diesem Zeitpunkt an konstant.

Parallel zur Betrachtung der tatsächlich geernteten Holzmengen und der zurückgelegten Wegstrecken nimmt die RAZ mit zunehmendem Abstand der Gassen immer weiter ab. Die Begründung dafür findet sich in der immer geringer werdenden, tatsächlich geernteten Holzmenge und in den ebenso – wenn auch nur in geringem Umfang - abnehmenden, zurückgelegten Wegstrecken. Mit zunehmendem

Gassenabstand können immer weniger Bäume von der Maschine erreicht werden, zusätzlich nehmen auch die Zeiten für das Fahren selbst ab. Dadurch reduziert sich automatisch auch die Reine Arbeitszeit.

Auswirkungen auf die Produktivität [fm/h]	
Ausgangssituation System Harvester	Mit Ausnahme des Parameters „Kranreichweite“ bleiben sämtliche Einstellungen bei allen Simulationsläufen unverändert.
Hypothese 1	Es wird erwartet, dass eine Veränderung der Kranreichweite des Harvesters in 1-Meter-Schritten (ausgehend von 10 m Kranreichweite) in diesem Fall dazu führt, dass 1. durch eine Erhöhung der Reichweite auf bis zu 13 m die Produktivität [fm/h] der Maschine zunimmt, und dass 2. durch eine Verminderung der Reichweite auf bis zu 7 m die Produktivität [fm/h] abnimmt.
Hypothese 2	Im Bezug auf die Erhöhung der Rückegassenabstände von 20 m auf 40 m lässt sich hinsichtlich der Produktivität keine konkrete Hypothese formulieren. Die Produktivität wird durch Berechnung des Quotienten aus der tatsächlich geernteten Holzmenge, angegeben in fm, und der für diesen Eingriff aufgewendeten Reinen Arbeitszeit ermittelt. Durch eine Veränderung des Gassenabstandes entsteht die Situation, dass sich immer weniger Bäume in Reichweite des Harvesters befinden. Dies wird in vielen Fällen dazu führen, dass die Maschine zwar nach wie vor die Rückegassen abfahren wird, dabei allerdings immer weniger Erntebäume aufarbeiten kann. Auf diese Weise wird sich das Verhältnis von Arbeitszeit, die für das Fällen und Aufarbeiten verbraucht wird, zu Arbeitszeit, die für das reine Fahren aufgewendet wird, in Richtung der Fahrzeiten verschieben. Somit kommt es voraussichtlich zu einer Verringerung der Produktivität.

Auswertung

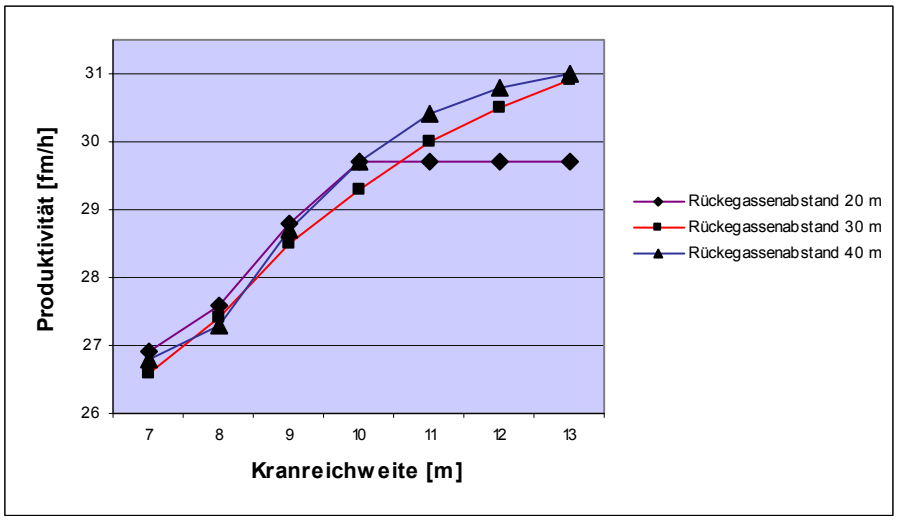


Abbildung 97: Auswirkung der Veränderung der Kranreichweite des Harvesters auf die Technische Arbeitsproduktivität (TAP) bei gleichzeitiger Erhöhung des Rückegassenabstandes von 20 m auf 40 m

Bei näherer Betrachtung von Abbildung 97 wird deutlich, dass sich die erste Hypothese bestätigt hat. Tatsächlich hat mit zunehmender Kranreichweite, unabhängig des Gassenabstandes, auch die Produktivität zugenommen. Eine Erklärung dafür liefert die Tatsache, dass durch die Erhöhung der Reichweite immer mehr Erntebäume gefällt und aufgearbeitet werden können. Das Verhältnis von

Ernte- und Fahrzeiten verschiebt sich nun also in Richtung der Erntezeiten, es wird also immer mehr Zeit produktiv genutzt und nicht mit unproduktivem Fahren verbraucht.
Die Vermutung, dass das Ergebnis hinsichtlich der veränderten Gassenabstände nicht eindeutig vorhergesagt werden kann, bestätigt sich ebenfalls. Deutlich zu erkennen ist, dass sowohl die Ausweitung auf 30 m-Abstände, als auch auf 40 m-Abstände hinsichtlich der Variante mit 20 m-Abständen zu einer Erhöhung der Produktivität führt. Wie aber ist dieses Ergebnis zu erklären?
Durch die Erhöhung der Gassenabstände von 20 m auf 30 m und 40 m fallen immer mehr Rückegassen weg, die Maschine muss also gegenüber der 20 m-Variante kürzere Wegstrecken zurücklegen. Bei 30 m Gassenabstand sind dies durchschnittlich 1,8 km, bei 40 m Abstand durchschnittlich 2,4 km weniger. Dadurch verändert sich das Verhältnis von Ernte- und Fahrzeiten wieder in Richtung der Erntezeiten und führt somit zu einer Erhöhung der Produktivität. Die Tatsache, dass durch die größeren Gassenabstände immer weniger Bäume erreichbar werden, fällt bei diesem Bestand nicht so stark ins Gewicht, als dass sich die Produktivität verringern könnte. Allerdings ist es durchaus möglich, dass dieser Effekt bei einem anderen Modell auftreten kann.
Die Position der Erntebäume im Bestand hat einen erheblichen Einfluss auf die Produktivität. Wären die Bäume in der Mehrzahl noch weiter in der Nähe der jeweiligen Transportgrenze angesiedelt, würde dies zu einer Verringerung der Produktivität führen. Umgekehrt würde eine Konzentration der Erntebäume in der Nähe der Forststraßen und Rückegassen eine Erhöhung der Produktivität bedeuten.

Auswirkungen auf die Kosten pro Festmeter [€]	
Ausgangssituation System Harvester	Mit Ausnahme des Parameters „Kranreichweite“ bleiben sämtliche Einstellungen bei allen Simulationsläufen unverändert.
Hypothese 1	Es wird erwartet, dass eine Veränderung der Kranreichweite des Harvesters in 1-Meter-Schritten (ausgehend von 10 m Kranreichweite) in diesem Fall dazu führt, dass 1. durch eine Erhöhung der Reichweite auf bis zu 13 m die Kosten pro Festmeter [€] abnehmen, und dass 2. durch eine Verminderung der Reichweite auf bis zu 7 m die die Kosten pro Festmeter [€] zunehmen.
Hypothese 2	Im Bezug auf die Erhöhung der Rückegassenabstände von 20 m auf 40 m lässt sich hinsichtlich der fm-Kosten keine konkrete Hypothese formulieren. Es wird aber davon ausgegangen, dass der Verlauf der Kosten stark mit den Ergebnissen der Untersuchungen zur Produktivität zusammenhängt.

Auswertung

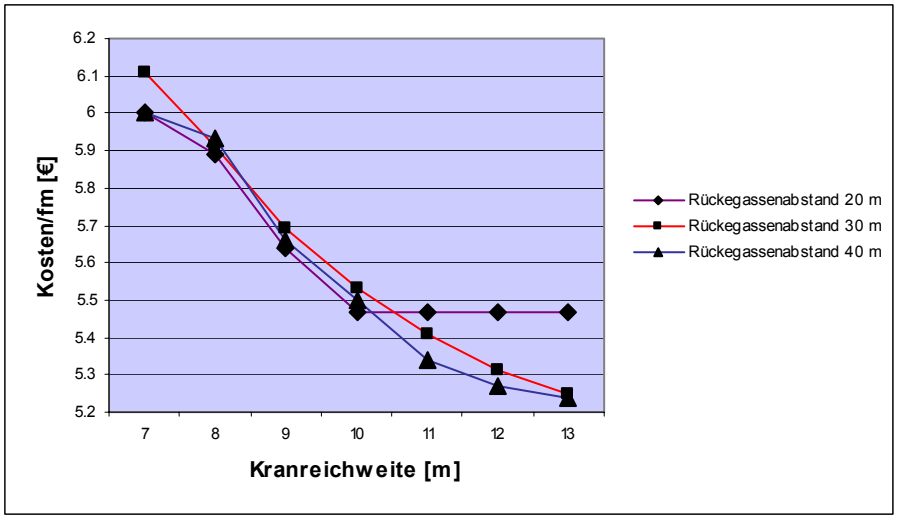


Abbildung 98: Auswirkung der Veränderung der Kranreichweite des Harvesters auf die Kosten pro Festmeter bei gleichzeitiger Erhöhung des Rückegassenabstandes von 20 m auf 40 m

Bei Betrachtung der Ergebnisse wird der Einfluss der bereits untersuchten Technischen Arbeitsproduktivität deutlich. Je produktiver ein Arbeitssystem arbeitet, umso geringer sind die Stückkosten. Dieser Effekt ist auch beim System Harvester zu beobachten. Bei einem Gassenabstand von 40 m und einer Kranreichweite von 13 m findet man bei dieser Versuchsreihe mit 5,24 € die niedrigsten fm-Kosten überhaupt (s. Abbildung 98). Geht man nun zurück zur Auswertung der Produktivitätsversuche, stellt man fest, dass an genau derselben Stelle mit 31,0 fm/h die Produktivität insgesamt am höchsten ist (s. Abbildung 97).

Zur Kontrolle lohnt sich ein Blick auf die Kosten bei einer Kranreichweite von 13 m. Hier findet sich bei der Abstandsvariante von 30 m der günstigste Wert (5,25 €). Betrachtet man nun die Produktivitätsergebnisse, zeigt sich, dass mit einer Produktivität von 30,9 fm/h ebenfalls der höchste Wert für diese Reichweite an dieser Position liegt.

Auswirkungen auf das Verhältnis der Zeitanteile für das Positionieren des Aggregats und das Befahren der Gassen und Wege an der RAZ	
Ausgangssituation System Harvester	Mit Ausnahme des Parameters „Kranreichweite“ bleiben sämtliche Einstellungen bei allen Simulationsläufen unverändert.
Hypothese 1	Es wird erwartet, dass eine Veränderung der Kranreichweite des Harvesters in 1-Meter-Schritten (ausgehend von 10 m Kranreichweite) in diesem Fall dazu führt, dass 1. durch eine Erhöhung der Reichweite auf bis zu 13 m der Zeitanteil für das Positionieren ansteigt, wobei gleichzeitig der Zeitanteil für das Befahren der Gassen abnimmt, und dass 2. durch eine Verminderung der Reichweite auf bis zu 7 m der Zeitanteil für das Positionieren abnimmt, wobei gleichzeitig der Zeitanteil für das Befahren der Gassen zunimmt.

Auswertung

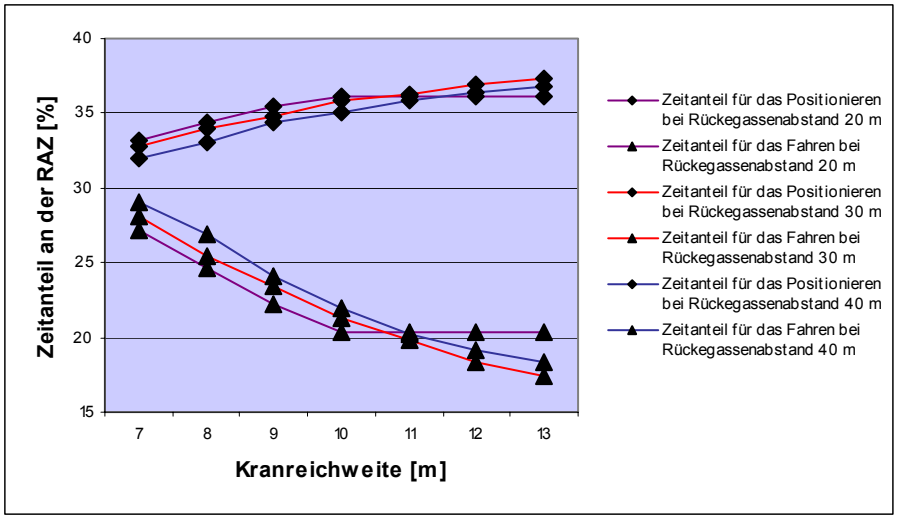


Abbildung 99: Auswirkung der Veränderung der Kranreichweite des Harvesters auf das Verhältnis der Zeitanteile für das Positionieren des Aggregats und das Befahren der Gassen und Wege an der RAZ bei gleichzeitiger Erhöhung des Rückegassenabstandes von 20 m auf 40 m

Das Verhältnis der Zeitanteile für das Positionieren des Aggregats und das Fahren während eines Holzernteeinsatzes des Harvesters zueinander lässt sich in Abbildung 99 ablesen. Dabei verhält es sich so, dass mit zunehmender Kranreichweite immer mehr Erntebäume von der Maschine erreicht und bearbeitet werden können. Dadurch erhöht sich automatisch der Zeitanteil für das Positionieren an der Reinen Arbeitszeit, da dieser Vorgang immer Bestandteil eines Erntezyklus ist. Durch diesen Anstieg bei den Positionierungszeiten sinken - im Verhältnis betrachtet - automatisch die Anteile für das Fahren auf den Gassen und Forstwegen, da sich die Streckenlängen bei allen drei Abstandsvarianten alleine betrachtet nachgewiesenermaßen nur unwesentlich verändert haben (s. Abbildung 95: Auswirkung der Veränderung der Kranreichweite des Harvesters auf die zurückgelegte Wegstrecke bei gleichzeitiger Erhöhung des Rückegassenabstandes von 20 m auf 40 m). Zusätzlich verringern sich durch die Erhöhung der Gassenabstände die individuellen Fahrstrecken, da immer weniger Gassen vorhanden sind, die befahren werden könnten.

Kurzzusammenfassung der Ergebnisse von Versuchsreihe 1 (Harvester):

Eine **Erhöhung der Kranreichweite** des Harvesters von 7 m auf 14 m verursachte während der Simulation die erwarteten Auswirkungen. Die **Anzahl der geernteten Bäume stieg deutlich an**, wobei sich dadurch die **RAZ erhöhte** und die **zurückgelegte Wegstrecke** der Maschine **leicht reduziert** wurde. Trotzdem **sank** insgesamt betrachtet **der Zeitanteil für das Befahren der Gassen und Straßen** bei gleichzeitiger **Erhöhung der produktiven Zeiten für das Positionieren** des Aggregats ab, was zu einem **Anstieg der Produktivität** und somit zu **zurückgehenden Kosten** führte.

Die **Zunahme der Rückegassenabstände** sorgte für eine **Verringerung** der **Anzahl zu erntender Bäume**, der **zurückgelegten Wegstrecke** und der **RAZ**, bewirkte aber einen – nicht vorhersehbaren - **Anstieg der Produktivität** und eine entsprechende **Kostensenkung**.

7.1.2 Versuchsreihe 2: Auswirkungen von Veränderungen des Zeitgrades des Harvesters auf verschiedene Systemparameter bei gleichzeitiger Veränderung des Rückegassenabstandes auf verschiedene Ergebnisgrößen

Zeitgrad: Das in Prozent ausgedrückte Verhältnis zwischen Vorgabezeit und tatsächlich verbrauchter Zeit. Durch Veränderung dieser Größe lässt sich für das System Harvester eine unterschiedliche Leistungsfähigkeit von Maschinenführern simulieren.

Auswirkungen auf die Reine Arbeitszeit (RAZ)	
Ausgangssituation System Harvester	Mit Ausnahme des Parameters „Zeitgrad“ bleiben sämtliche Einstellungen bei allen Simulationsläufen unverändert.
Hypothese 1	Es wird erwartet, dass eine Veränderung des Zeitgrades des Harvesters (ausgehend von einem Zeitgrad 100) in diesem Fall dazu führt, dass 1. durch eine Erhöhung des Zeitgrades auf 130 die Reine Arbeitszeit [h] der Maschine abnimmt, und dass 2. durch eine Verminderung des Zeitgrades auf 70 die Reine Arbeitszeit [h] zunimmt.
Hypothese 2	Im Bezug auf die Erhöhung der Rückegassenabstände von 20 m auf 40 m wird erwartet, dass die Reine Arbeitszeit schrittweise abnimmt. Diese Vermutung ergibt sich aus der Betrachtung der bereits durchgeführten Versuchsreihe mit dem Parameter „Kranreichweite“ (vgl. Kapitel 7.1.1)

Auswertung

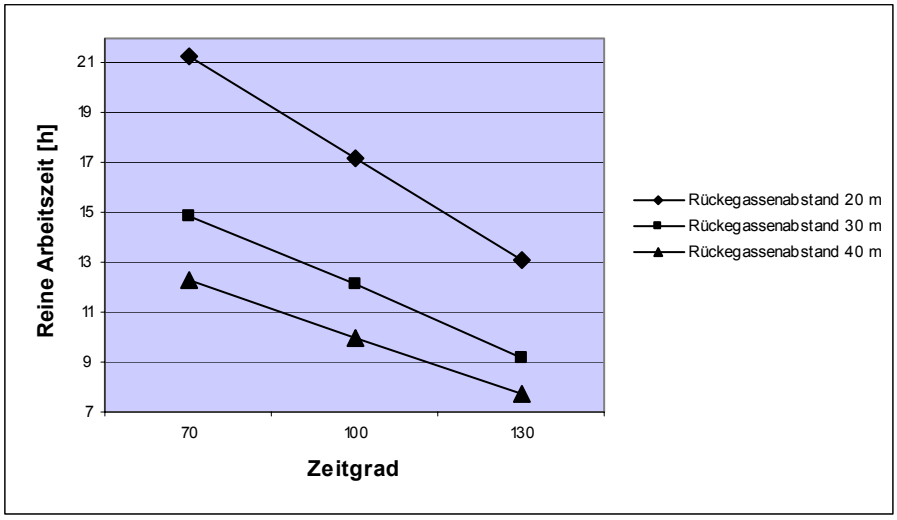


Abbildung 100: Auswirkung der Veränderung des Zeitgrades des Harvesters auf die Reine Arbeitszeit (RAZ), bei gleichzeitiger Erhöhung des Rückegassenabstandes von 20 m auf 40 m

Die genauen Simulationsergebnisse sind in Anhang III aufgeführt.

Durch die Veränderung des Zeitgrades, ausgehend von einem Zeitgrad 100, treten die erwarteten Effekte hinsichtlich des Zeitverbrauches auf (s. Abbildung 100).
Es ist zu erkennen, dass die RAZ mit steigendem Zeitgrad abnimmt bzw. bei abnehmendem Zeitgrad zunimmt. Ein Zeitgrad von 130 bewirkt eine Leistungssteigerung des Maschinenführers um 30 % bzw.

ein Zeitgrad von 70 eine Minderung um 30 %. Dabei ist es wichtig, zu beachten, dass sich der Zeitgrad auf alle produktiven Arbeitsabschnitte auswirkt. Bei diesem Arbeitssystem sind dies die Prozesse „Positionieren des Aggregats“, „Fällen“ und „Aufarbeiten“. Die Fahrgeschwindigkeit und das Fahrverhalten bleiben unbeeinflusst. Auf der Basis dieser Erkenntnis lässt sich das nun folgende Ergebnis besser erläutern.

Bei erstem Hinsehen könnte man annehmen, eine Erhöhung bzw. Verringerung des Zeitgrades um 30 % würde automatisch eine entsprechende Veränderung bei der RAZ bewirken. Betrachtet man nun die Ergebnisse, sieht man, dass sich die RAZ bei einem Zeitgrad von 70 und einem Rückegassenabstand von 20 m im Vergleich mit dem Ausgangswert bei einem Zeitgrad 100 aber nur um 23,8 % erhöht hat. Ebenso sank der RAZ-Wert bei einem Zeitgrad von 130 nur um 23,8 % ab. Wie ist dies zu erklären?

Da sich die RAZ aus den Zeiten für das Positionieren, Fällen und Aufarbeiten der Bäume sowie den Fahrzeiten zusammensetzt, wirken sich die Veränderungen des Zeitgrades also nur auf diese Arbeitsprozesse aus. Damit verändert sich gleichzeitig das jeweilige Verhältnis der Zeitanteile für das Positionieren, Fällen und Aufarbeiten und das Befahren der Gassen und Wege an der RAZ. Steigt beispielsweise der Zeitgrad, sinkt automatisch der Anteil für „Positionieren“ sowie „Fällen und Aufarbeiten“, der Anteil der Fahrzeiten aber steigt proportional dazu an (s. unten). Dies erklärt, warum einer Erhöhung des Zeitgrades um 30 % nicht automatisch eine Erhöhung der RAZ um 30 % nach sich zieht.

Hypothese 2 kann ebenfalls bestätigt werden.

Auswirkungen auf das Verhältnis der Zeitanteile für das Positionieren des Aggregats und das Fällen + Aufarbeiten und das Befahren der Gassen und Wege an der RAZ	
Ausgangssituation System Harvester	Mit Ausnahme des Parameters „Zeitgrad“ bleiben sämtliche Einstellungen bei allen Simulationsläufen unverändert.
Hypothese 1	Es wird erwartet, dass eine Veränderung des Zeitgrades des Harvesters (ausgehend von einem Zeitgrad 100) in diesem Fall dazu führt, dass 1. durch eine Erhöhung des Zeitgrades auf 130 der Zeitanteil für das Positionieren und Fällen + Aufarbeiten abnimmt, wobei gleichzeitig der Zeitanteil für das Befahren der Gassen proportional zunimmt, und dass 2. durch eine Verminderung des Zeitgrades auf 70 der Zeitanteil für das Positionieren und Fällen + Aufarbeiten zunimmt, wobei gleichzeitig der Zeitanteil für das Befahren der Gassen proportional abnimmt.

Auswertung

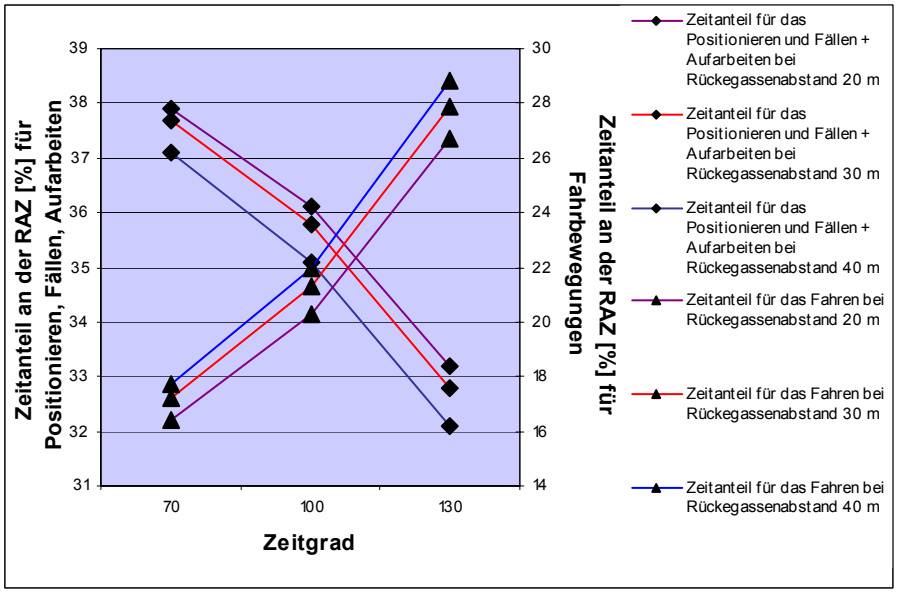


Abbildung 101: Auswirkung der Veränderung des Zeitgrades auf das Verhältnis der Zeitanteile für das Positionieren und das Fällen und Aufarbeiten sowie für das Befahren der Wege und Gassen an der RAZ bei gleichzeitiger Erhöhung des Rückegassenabstandes von 20 m auf 40 m

Aus der oben abgebildeten Grafik wird ersichtlich, dass die Zeitanteile für „Positionieren, Fällen und Aufarbeiten“ mit zunehmendem Zeitgrad abnehmen, wobei gleichzeitig die Anteile der Fahrzeiten an der RAZ ansteigen (s. Abbildung 101). Dieses Systemverhalten wird durch die Verminderung der Arbeitszeit für das Bearbeiten der Bäume bestimmt, die mit einer Erhöhung des Zeitgrades eintritt. Daher steigt der Anteil der Fahrzeiten proportional zur Verringerung der Zeiten für „Positionieren, Fällen und Aufarbeiten“ an. Eine Reduzierung des Zeitgrades bewirkt entsprechend das Gegenteil.
Die Tatsache, dass bei Gassenabständen von 20 m die Fahrzeitanteile am niedrigsten und die Anteile für das Bearbeiten der Bäume am höchsten sind, erklärt sich dadurch, dass bei allen drei Modellen mit der vorab eingestellten Kranreichweite von 10 m nur in diesem Erschließungsszenario alle Erntebäume durch die Maschine aufgearbeitet werden können. Die Erhöhung des Zeitgrades wirkt sich also an dieser Stelle am stärksten aus.

Auswirkungen auf die Produktivität [fm/h]	
Ausgangssituation System Harvester	Mit Ausnahme des Parameters „Zeitgrad“ bleiben sämtliche Einstellungen bei allen Simulationsläufen unverändert.
Hypothese 1	Es wird erwartet, dass eine Veränderung des Zeitgrades des Harvesters (ausgehend von einem Zeitgrad 100) in diesem Fall dazu führt, dass 1. durch eine Erhöhung des Zeitgrades auf 130 die Produktivität [fm/h] der Maschine zunimmt, und dass 2. durch eine Verminderung des Zeitgrades auf 70 die Produktivität [fm/h] abnimmt.
Hypothese 2	Im Bezug auf die Erhöhung der Rückegassenabstände von 20 m auf 40 m lässt sich hinsichtlich der Produktivität keine konkrete Hypothese formulieren. Die Produktivität wird durch Berechnung des Quotienten aus der tatsächlich geernteten Holzmenge, angegeben in fm, und der für diesen Eingriff aufgewendeten Reinen Arbeitszeit ermittelt. Durch eine Veränderung des Gassenabstandes entsteht die Situation, dass sich immer weniger Bäume in Reichweite des Harvesters befinden. Dies wird in vielen Fällen dazu führen, dass die Maschine zwar nach wie vor die Rückegassen abfahren wird, dabei allerdings immer weniger Erntebäume aufarbeiten kann. Auf diese Weise wird sich das Verhältnis von Arbeitszeit, die für das Fällen und Aufarbeiten verbraucht wird, zu Arbeitszeit, die für das reine Fahren aufgewendet wird, in Richtung der Fahrzeiten verschieben. Somit kommt es voraussichtlich zu einer Verringerung der Produktivität.

Auswertung

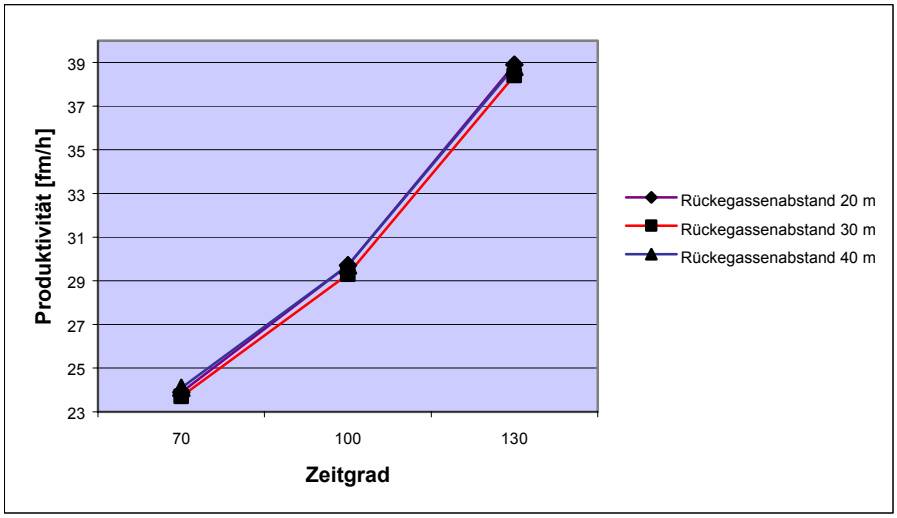


Abbildung 102: Auswirkung der Veränderung des Zeitgrades des Harvesters auf die Produktivität bei gleichzeitiger Erhöhung des Rückegassenabstandes von 20 m auf 40 m

Die Produktivität steigt mit zunehmendem Zeitgrad, verursacht durch die reduzierten Zeiten für das „Positionieren, Fällen und Aufarbeiten“, ebenfalls an bzw. fällt bei einem verringerten Zeitgrad ab (s. Abbildung 102).

Ein konkreter Unterschied hinsichtlich der unterschiedlichen Rückegassenabstände ist nicht direkt feststellbar. Bei allen drei Varianten arbeitet das System nahezu mit der gleichen Produktivität.

Der Wert der Produktivität liegt bei einem Zeitgrad von 130 im Bereich von ca. 38,7 fm/h. Dieser Wert erscheint recht hoch, erklärt sich aber dadurch, dass hier die Reine Arbeitszeit für den Harvester berechnet wird.

Auswirkungen auf die Kosten pro Festmeter [€]	
Ausgangssituation System Harvester	Mit Ausnahme des Parameters „Zeitgrad“ bleiben sämtliche Einstellungen bei allen Simulationsläufen unverändert.
Hypothese 1	Es wird erwartet, dass eine Veränderung des Zeitgrades des Harvesters (ausgehend von einem Zeitgrad 100) in diesem Fall dazu führt, dass 1. durch eine Erhöhung des Zeitgrades auf 130 die Kosten pro Festmeter [€] abnehmen, und dass 2. durch eine Verminderung des Zeitgrades auf 70 die Kosten pro Festmeter [€] zunehmen.
Hypothese 2	Im Bezug auf die Erhöhung der Rückegassenabstände von 20 m auf 40 m lässt sich hinsichtlich der fm-Kosten keine konkrete Hypothese formulieren. Es wird aber davon ausgegangen, dass der Verlauf der Kosten stark mit den Ergebnissen der Untersuchungen zur Produktivität zusammenhängt.

Auswertung

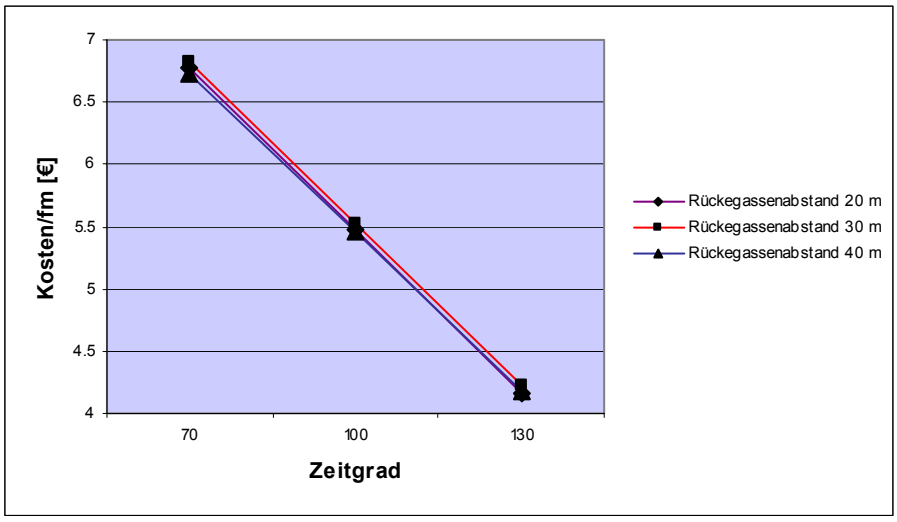


Abbildung 103: Auswirkung der Veränderung des Zeitgrades des Harvesters auf die Kosten pro Festmeter bei gleichzeitiger Erhöhung des Rückegassenabstandes von 20 m auf 40 m

Verglichen mit den Ergebnissen der Versuche zur Produktivität sinken die Kosten pro Festmeter mit steigendem Zeitgrad ebenfalls ab (s. Abbildung 103). Durch die höhere Produktivität bzw. den geringeren Aufwand an Maschinenarbeitsstunden verringern sich automatisch auch die entstehenden Kosten. Genauso verhält es sich auch bei der Betrachtung der Ergebnisse zu den verschiedenen Gassenabständen. Analog zu den Beobachtungen bei der Produktivität sind kaum Unterschiede im Preisniveau auszumachen.

Kurzzusammenfassung der Ergebnisse von Versuchsreihe 2 (Harvester):

Wird die Leistungsfähigkeit des Maschinenführers in der Simulation durch **Erhöhung des Zeitgrades** von 70 auf 100 und 130 gesteigert, führt dies folgerichtig zu einer **Abnahme der RAZ** durch die schnellere Durchführung der produktiven Arbeitsschritte „Positionieren des Aggregats", „Fällen" und „Aufarbeiten". Der **Anteil der Fahrzeiten an der RAZ steigt** somit **an**, die **Produktivität nimmt** ebenfalls deutlich **zu** und die **Kosten pro Festmeter sinken** proportional dazu **ab**. Alle diese realistischen Effekte konnten **unabhängig von der jeweiligen Distanz der Rückegassen** zueinander immer wieder beobachtet werden.

7.1.3 Versuchsreihe 3: Auswirkungen von Veränderungen des Anteils der Maschinenarbeitsstunden (MAS) an der Gesamtarbeitszeit (GAZ) des Harvesters auf verschiedene Systemparameter bei gleichzeitiger Veränderung des Rückegassenabstandes

Wie bereits erläutert, setzt sich die Gesamtarbeitszeit (GAZ) eines Arbeitssystems aus der Reinen Arbeitszeit (RAZ) und den Allgemeinen Zeiten (AZ) zusammen. Um die Bedeutung dieses Parameters im Modell zu verdeutlichen, soll an dieser Stelle noch einmal kurz die Funktion des „Störzeitenmoduls" erläutert werden (vgl. Kapitel 5.2).

Das Modul arbeitet im Wesentlichen mit dem in Prozent ausgedrückten Verhältnis von Gesamtarbeitszeit (GAZ) zu Reiner Arbeitszeit (RAZ) bzw. zu den Allgemeinen Zeiten (AZ). Dabei wird die GAZ immer als 100 %-Wert angesehen. Der Nutzer ist nun in der Lage, im Menü des Harvesters oder Forwarders für die RAZ einen bestimmten Prozentwert, z.B. 70 % anzugeben. Dies bedeutet, dass während der Simulation 70 % der GAZ (unabhängig von ihrer tatsächlichen Länge) Reine Arbeitszeiten, ausgedrückt in MAS, sein sollen. Im Umkehrschluss beträgt die Dauer der AZ demnach 30 % der GAZ-Dauer.

Die Berechnungen, wann eine Unterbrechung beginnt und wie lange sie dauern wird, erstellt das Modell dynamisch. Die erste Unterbrechung tritt rein zufällig innerhalb der ersten Schicht mit einer aus der entsprechenden Dreiecksfunktion ermittelten Dauer auf. Ist die Unterbrechung beendet, überprüft das Modell automatisch das aktuelle Verhältnis RAZ:AZ. War die Unterbrechung so lange, dass das in diesem Fall gewählte Verhältnis von 70:30 überschritten wurde (z.B. 60:40), führt dieses Ergebnis dazu, dass es erst zu einem späteren Zeitpunkt zu einer weiteren Störung kommen wird. Dadurch verstreicht wieder mehr Reine Arbeitszeit, das Verhältnis verschiebt sich demnach in die vorgesehene Richtung (70:30). Umgekehrt führt eine zu kurze Unterbrechung dazu, dass die nächste Störung nicht allzu lange auf sich warten lassen wird.

Auswirkungen auf die Gesamtarbeitszeit (GAZ)	
Ausgangssituation System Harvester	Mit Ausnahme des Parameters „MAS-Anteil an der GAZ“ bleiben sämtliche Einstellungen bei allen Simulationsläufen unverändert.
Hypothese 1	Es wird erwartet, dass eine Veränderung des Anteils der MAS an der GAZ des Harvesters in diesem Fall dazu führt, dass (ausgehend von einem Anteil von 50 %) durch eine Erhöhung dieses Anteils auf bis zu 100 % die GAZ der Maschine abnimmt.
Hypothese 2	Im Bezug auf die Erhöhung der Rückegassenabstände von 20 m auf 40 m wird erwartet, dass die GAZ schrittweise abnimmt.

Die genauen Simulationsergebnisse sind in Anhang IV aufgeführt.

Auswertung

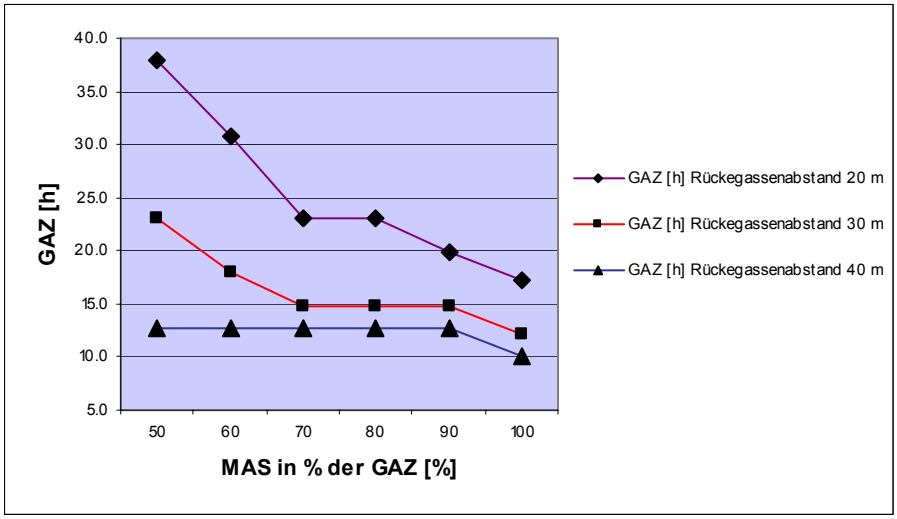


Abbildung 104: Auswirkung der Veränderung des MAS-Anteils an der GAZ des Harvesters auf die Gesamtarbeitszeit (GAZ) bei gleichzeitiger Erhöhung des Rückegassenabstandes von 20 m auf 40 m

Eine Erhöhung des Anteiles der Maschinenarbeitsstunden (MAS) an der Gesamtarbeitszeit (GAZ) bedeutet bekanntermaßen eine gleichzeitige Reduktion des Anteils der Allgemeinen Zeiten (AZ). Dieser Effekt lässt sich bei Betrachtung der Versuchsergebnisse auch im vorliegenden Modell nachweisen. Die GAZ nimmt unter Erhöhung des MAS-Anteiles stetig ab (s. Abbildung 104).

Gleichzeitig ist zu beobachten, dass die Ausdehnung des Gassenabstandes insgesamt dazu führt, dass die GAZ geringer wird. Dieses Ergebnis wurde im Hinblick auf die vorangegangenen Untersuchungen zur Reinen Arbeitszeit (RAZ) erwartet.

An verschiedenen Stellen, z.B. bei einem Rückegassenabstand von 20 m und einem MAS-Anteil von 70 % und 80 % oder bei einem Abstand von 40 m und den MAS-Anteilen von 50 % bis 90 % treten keine Veränderungen bei der GAZ auf. Dabei kann es vorkommen, dass es trotz einer Erhöhung des MAS-Anteiles an der GAZ nicht zu einer Veränderung kommt, da die entsprechende Schichtdauer noch „zu kurz“ ist, um die Anzahl der Unterbrechungen zu variieren. Das bedeutet, dass sich die Veränderungen der GAZ bei einem Abstand von 40 m nicht so stark auf die Simulation der unterschiedlichen MAS-Anteile auswirken, wie bei Abständen von 20 und 30 Metern. Bei 40 m Gassenabstand ist eine relativ kurze RAZ zu beobachten (10 MAS), d.h. die Maschine kann den Holzernteeingriff auf der ca. 11 ha großen Fläche im Normalfall innerhalb eines Tages erledigen. Für

den Einsatz des Störungsmoduls ist diese geringe Arbeitszeit problematisch, da das Modul an einem Arbeitstag bzw. während einer Schicht meist nur eine einzige Unterbrechung simuliert. In diesem Fall wird bereits bei einem MAS-Anteil von 50 % an der GAZ nur eine Unterbrechung in die Simulation integriert. Die im Anschluss vorgesehene Verringerung des MAS-Anteils ist daher nur noch sehr eingeschränkt möglich und findet somit erst bei einem Anteil von 90 % statt. Würde die Holzernte mehrere Tage in Anspruch nehmen, wäre das Störungsmodul aber problemlos in der Lage, die jeweiligen MAS-Anteile zu simulieren.

Auswirkungen auf den Anteil der Allgemeinen Zeiten (AZ) an der Gesamtarbeitszeit (GAZ)	
Ausgangssituation System Harvester	Mit Ausnahme des Parameters „MAS-Anteil an der GAZ“ bleiben sämtliche Einstellungen bei allen Simulationsläufen unverändert.
Hypothese 1	Es wird erwartet, dass eine Veränderung des Anteils der MAS an der GAZ des Harvesters in diesem Fall dazu führt, dass (ausgehend von einem Anteil von 50 %) durch eine Erhöhung dieses Anteils auf bis zu 100 % der Anteil der Allgemeinen Zeiten (AZ) an der Gesamtarbeitszeit (GAZ) der Maschine abnimmt.
Hypothese 2	Im Bezug auf die Erhöhung der Rückegassenabstände von 20 m auf 40 m wird erwartet, dass der Anteil der Allgemeinen Zeiten (AZ) an der Gesamtarbeitszeit (GAZ) schrittweise abnimmt. Diese Vermutung ergibt sich bei Betrachtung der bei den vorangegangenen Versuchen erzielten Ergebnisse.

Auswertung

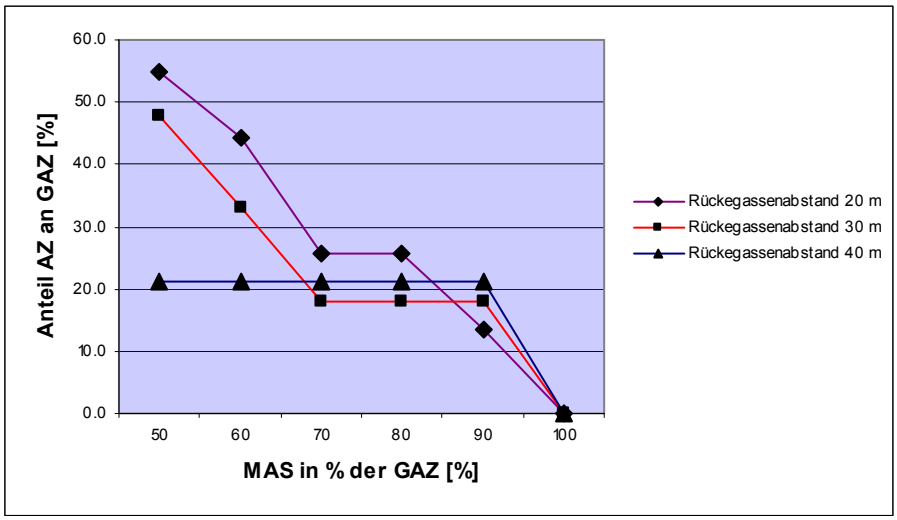


Abbildung 105: Auswirkung der Veränderung des MAS-Anteils an der GAZ des Harvesters auf den Anteil der Allgemeinen Zeiten (AZ) an der Gesamtarbeitszeit (GAZ) bei gleichzeitiger Erhöhung des Rückegassenabstandes von 20 m auf 40 m

Beide Hypothesen können anhand der Ergebnisse bestätigt werden. Wie bereits im Versuch zuvor gezeigt, führt auch in diesem Beispiel die Erhöhung des Anteiles der MAS an der GAZ zu einer Reduktion des Anteils der AZ (s. Abbildung 105).

Des Weiteren nimmt der Anteil der AZ an der GAZ mit zunehmendem Gassenabstand ab, da bei einem Abstand von 20 m die Dauer der RAZ, verglichen mit den Varianten 30 m und 40 m, am

größten ausfällt und daher der Anteil der AZ mit Hilfe des Störungsmoduls besser simuliert werden kann, da durch die längere RAZ mehr Unterbrechungen integriert werden können.
Die voreingestellten Verhältnisse von RAZ zu AZ werden nicht in allen Fällen während der Simulation erreicht. So findet sich beispielsweise bei einem Gassenabstand von 20 m und einem MAS-Anteil von 50 % ein AZ-Wert von 54,9 % anstatt der erwarteten 50 %. Diese Abweichung lässt sich dadurch erklären, dass in diesem Fall eine Unterbrechung „zu lange“ gedauert hat. Da das „Störungsmodul“ die erste Unterbrechung immer zu einem zufällig ausgewählten Zeitpunkt platziert, kann es zu diesem Phänomen kommen. Dabei wird der entsprechende Zeitpunkt zwar per Zufall bestimmt, er bleibt dann aber immer gleich, sodass eine Wiederholung der Simulation zu keiner Veränderung im Ergebnis führt. Würde die Laufzeit der Simulation, also die GAZ, noch kürzer ausfallen, hätte das Modell mit dem Weglassen einer Unterbrechung wieder für einen „Ausgleich“ bei den Zeitanteilen gesorgt.

Auswirkungen auf die TAP [fm/MAS]	
Ausgangssituation System Harvester	Mit Ausnahme des Parameters „MAS-Anteil an der GAZ“ bleiben sämtliche Einstellungen bei allen Simulationsläufen unverändert.
Hypothese 1	Es wird erwartet, dass eine Veränderung des Anteils der MAS an der GAZ des Harvesters in diesem Fall dazu führt, dass (ausgehend von einem Anteil von 50 %) durch eine Erhöhung dieses Anteils auf bis zu 100 % die TAP zunimmt.
Hypothese 2	Im Bezug auf die Erhöhung der Rückegassenabstände von 20 m auf 40 m lässt sich hinsichtlich der TAP keine konkrete Hypothese formulieren, da die zahlreichen, schwer zu gewichtenden Einflussfaktoren (z.B. Durchforstungsart, Durchforstungsstärke, Baumpositionen) dies nicht zulassen.

Auswertung

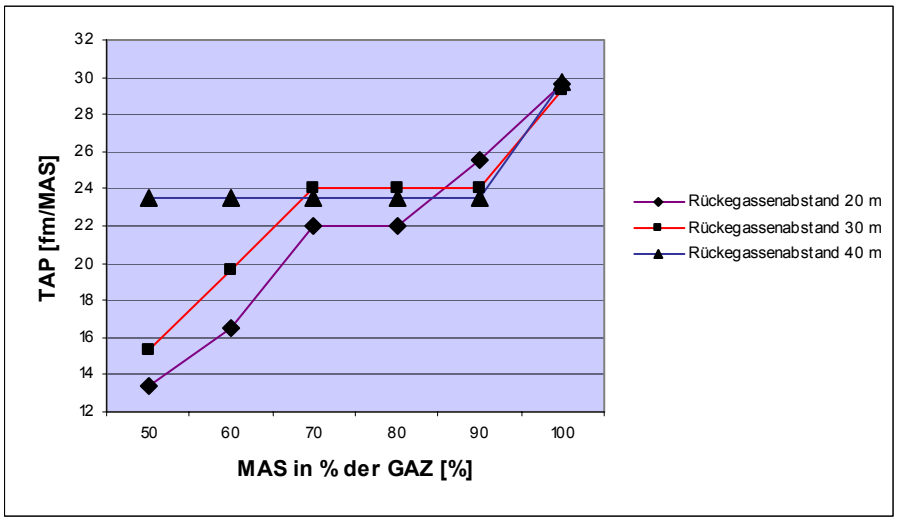


Abbildung 106: Auswirkung der Veränderung des MAS-Anteils an der GAZ des Harvesters auf die TAP bei gleichzeitiger Erhöhung des Rückegassenabstandes von 20 m auf 40 m

Durch die Absenkung des AZ-Anteils an der GAZ arbeitet das System erwartungsgemäß immer produktiver (s. Abbildung 106). Bei Gassenabständen von 20 m und 30 m liegen die Produktivitäten in ähnlichen Wertebereichen, wohingegen bei 40 Metern Abstand der bereits angesprochene Effekt der „zu kurzen“ RAZ zu beobachten ist.

Was aber passiert, wenn man die Anzahl der zu erntenden Bäume erhöht?

In einem weiteren Versuch wurden mehr Erntebäume im Bestand ausgewählt. Tabelle 51 zeigt die dabei hinsichtlich der Erntebaum-Anzahlen auftretenden Unterschiede.

Tabelle 51: Erweiterte Anzahl an Erntebäumen zum Vergleich mit den Ergebnissen der ursprünglichen Bestände

	20 m RG-Abstand	30 m RG-Abstand	40 m RG-Abstand
Anzahl zu entnehmender Bäume bisher [Stk.]	1085	1190	1245
Erweiterte Anzahl zu entnehmender Bäume [Stk.]	2232	3437	3750
Zunahme an Erntebäumen [%]	99.9	188.9	201.2

Die aufstockenden Erntebäume werden in den verschiedenen Modellen in ihrer Menge deutlich erhöht, im 40 m-Modell kommt es sogar zu einer Verdreifachung der Baumzahlen.

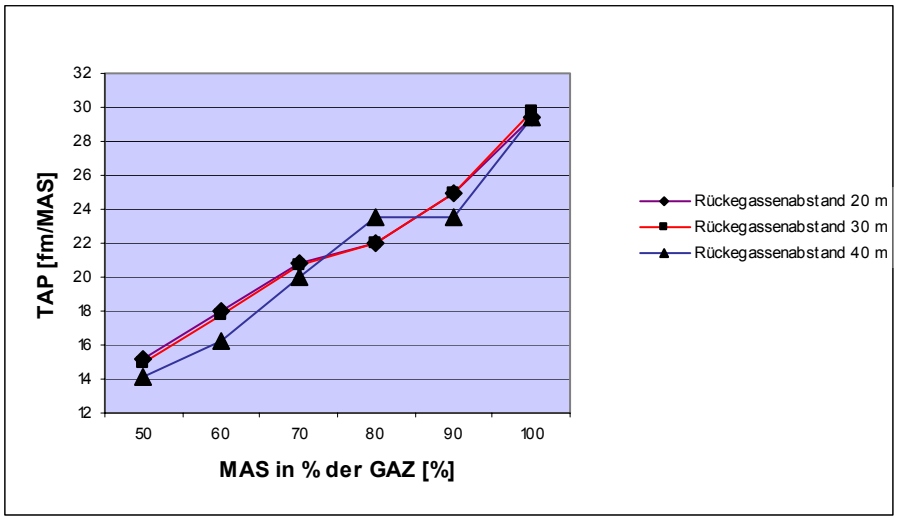


Abbildung 107: Auswirkung der Veränderung des MAS-Anteils an der GAZ des Harvesters auf die TAP bei gleichzeitiger Erhöhung des Rückegassenabstandes von 20 m auf 40 m und zusätzlich erhöhter Erntebaumanzahl

Abbildung 107 zeigt folgenden Unterschied beim Verlauf der Graphen im Vergleich zu Abbildung 106: Bis auf die Ausnahme bei Gassenabstand 40 m und MAS-Anteilen von 80 % bis 90 %, bei denen es keine Veränderung der TAP gibt, nimmt diese über die einzelnen MAS-Stufen hinweg stetig zu. Auch beim 40 m-Modell ist die RAZ nun „ausreichend lange“ für das Störungsmodul, um eine problemlose Simulation der Unterbrechungen durchzuführen.

Kurzzusammenfassung der Ergebnisse von Versuchsreihe 3 (Harvester):

Durch **Simulation stetig abnehmender Störungs- und Pausenzeiten** mit Anteilen von 50 % bis zu, in der Realität nur sehr selten anzutreffenden 0 % an der **GAZ**, **sinken die Werte** für diese Gesamtarbeitszeit immer weiter ab, was die **TAP erhöht**. Diese Modellfunktion arbeitet bei längeren Simulationsläufen besser, da in diesen Fällen ausreichend Zeit für das Störungsmodul vorhanden ist, um sich bei der Darstellung der verschiedenen Unterbrechungsanteile anzupassen.

7.2 Versuche mit dem Arbeitssystem Motormanuelle Holzernte

Zu Beginn dieses Kapitels sollen die wichtigsten Einfluss- und Ergebnisgrößen zum Arbeitssystem Motormanuelle Holzernte und ihre Beziehungen zueinander kurz dargestellt werden (s. Abbildung 108).

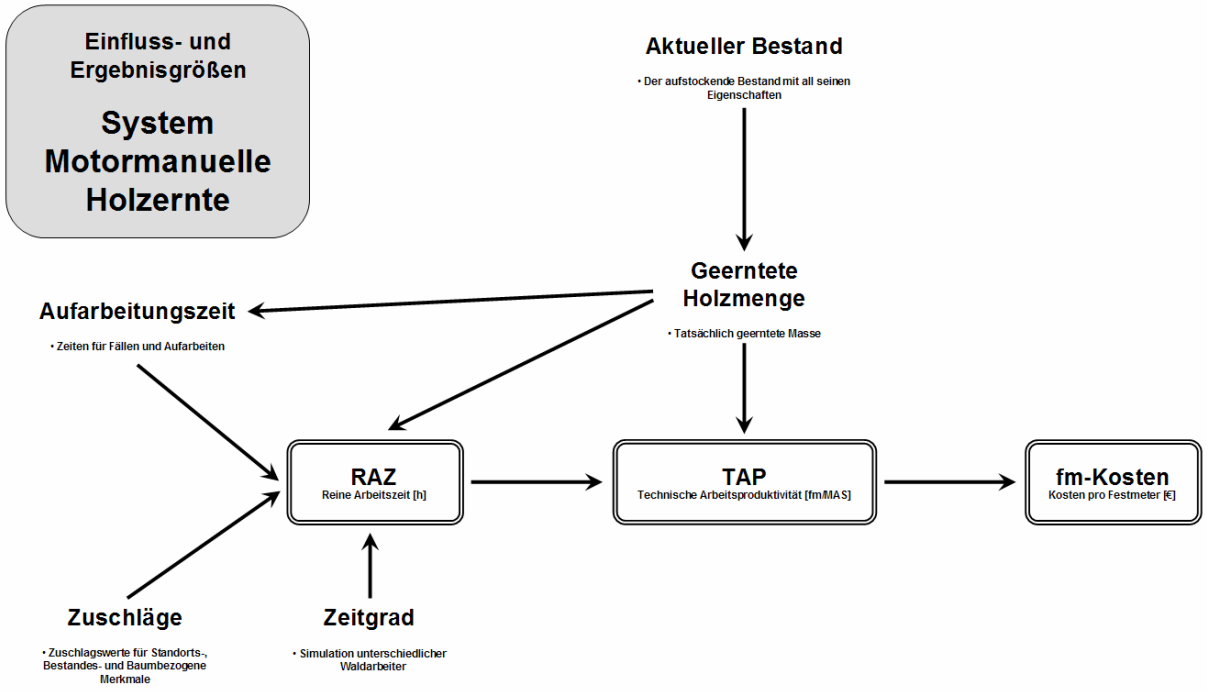


Abbildung 108: Einfluss- und Ergebnisgrößen für das System Motormanuelle Holzernte

Reine Arbeitszeit (RAZ), Technische Arbeitsproduktivität (TAP) und Kosten pro Festmeter gelten auch in diesem Fall wieder als wichtigste Größen zur Entscheidungsfindung. Die Berechnung der Leistungskennzahlen bei der Holzernte mit Waldarbeitern beruht in diesem Fall auf den Produktivitätswerten des Erweiterten Sortentarifs (EST; s. TARIFVERTRAG, 2000). Dabei handelt es sich um ein Tabellenwerk, das seit geraumer Zeit in den deutschen Staatsforsten zur Verlohnung der Waldarbeiter eingesetzt wird. Zusätzlich zu den einzelnen Arbeitszeiten kommen noch individuell auswählbare standorts-, bestandes- sowie baumbezogene Zuschlagswerte hinzu, die, angegeben in Prozent, auf die Arbeitszeitwerte der einzelnen Waldarbeiter angewendet werden. Im Modell können maximal drei Personen gleichzeitig simuliert und mit Hilfe des Zeitgrades in ihrer Leistungsfähigkeit unterschiedlich dargestellt werden.

7.2.1 Versuchsreihe 1: Auswirkungen von Veränderungen der Anzahl von Waldarbeitern auf verschiedene Systemparameter bei gleichzeitiger Veränderung des Rückegassenabstandes

Simuliert werden in den drei unterschiedlichen Bestandesszenarien zuerst ein, dann zwei und schließlich drei Waldarbeiter, für die jeweils ein Zeitgrad von 100 eingestellt ist. In Tabelle 52 ist zu erkennen, dass dabei für die wichtigen Ergebnisgrößen Maschinenarbeitsstunden (MAS), Technische Arbeitsproduktivität (TAP) und Kosten pro Festmeter unabhängig von der Anzahl der Arbeiter immer dieselben (Durchschnitts-)Werte errechnet werden. Eine Auswirkung auf diese Größen ist also nicht feststellbar, da durch den Einsatz des EST feste Arbeitszeiten pro bearbeiteten Abschnitt festgelegt sind, auf die eine Veränderung der Arbeiteranzahl keinen Einfluss hat.

Tabelle 52: Simulationsergebnisse Versuchsreihe 1 für das System Motormanuelle Holzernte

Anzahl Waldarbeiter	Durchschnittswerte der beobachteten Größen	Zeitgrad	20 m RG-Abstand	30 m RG-Abstand	40 m RG-Abstand
1	**MAS [h]**	100	265.9	292.5	305.3
2	**MAS [h]**	100	265.9	292.5	305.3
3	**MAS [h]**	100	265.9	292.5	305.3
1	**TAP [fm/MAS]**	100	1.9	1.9	1.9
2	**TAP [fm/MAS]**	100	1.9	1.9	1.9
3	**TAP [fm/MAS]**	100	1.9	1.9	1.9
1	**Fm-Kosten [€/fm]**	100	10.60	10.60	10.60
2	**Fm-Kosten [€/fm]**	100	10.60	10.60	10.60
3	**Fm-Kosten [€/fm]**	100	10.60	10.60	10.60

Auswirkungen auf die Gesamtarbeitszeit (GAZ)	
Ausgangssituation System Motormanuelle Holzernte	Mit Ausnahme des Parameters „Anzahl der Arbeiter“ bleiben sämtliche Einstellungen bei allen Simulationsläufen unverändert.
Hypothese 1	Es wird erwartet, dass bei einer Erhöhung der Arbeiterzahl auf bis zu drei Personen die Gesamtarbeitszeit [Tage], also die Dauer zur Durchführung des Hiebes abnimmt.
Hypothese 2	Im Bezug auf die Erhöhung der Rückegassenabstände von 20 m auf 40 m wird erwartet, dass die Gesamtarbeitszeit schrittweise zunimmt, da sich mit zunehmendem Abstand die Anzahl der Erntebäume erhöht.

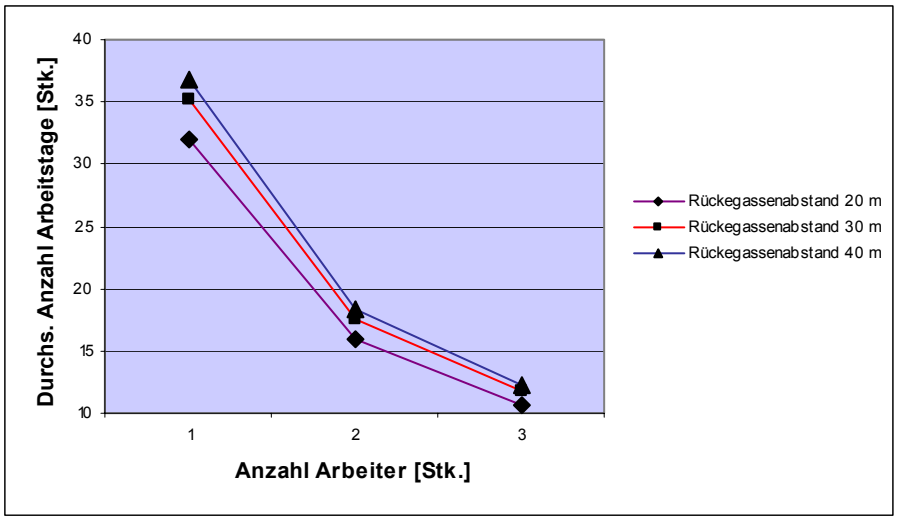


Abbildung 109: Auswirkung der Veränderung der Anzahl von Arbeitern bei der Motormanuellen Holzernte auf die durchschnittliche Anzahl an Arbeitstagen bei einem Zeitgrad von 100 und gleichzeitiger Erhöhung des Rückegassenabstandes von 20 m auf 40 m

Die Versuchsergebnisse zeigen, dass es einer größeren Anzahl an Arbeitskräften möglich ist, die auszuführenden Arbeiten in wesentlich kürzerer Zeit fertig zu stellen, als einem Arbeiter alleine (s. Abbildung 109). Bei einem Rückegassenabstand von 20 m und einer zu erntenden Menge von 508,7 fm benötigt ein Waldarbeiter (Zeitgrad 100) 32 Arbeitstage, um das Holz aufzuarbeiten. Dagegen liegt die Arbeitszeit bei drei Waldarbeitern, die die gleiche Holzmasse bewältigen müssen, durchschnittlich nur noch bei 10,7 Tagen.
Die Erhöhung der Gassenabstände hat zur Folge, dass die Gesamtarbeitszeit aufgrund der zunehmenden Erntemenge insgesamt ansteigt. Somit können beide Hypothesen bestätigt werden.

Kurzzusammenfassung der Ergebnisse von Versuchsreihe 1 (Motormanuelle Holzernte):

Bearbeiten mehrere Arbeiter dieselbe Anzahl an Erntebäumen, brauchen sie insgesamt deutlich weniger Zeit (GAZ), als ein Waldarbeiter alleine.

7.2.2 Versuchsreihe 2: Auswirkungen von Veränderungen des Zeitgrades von drei Waldarbeitern auf verschiedene Systemparameter bei gleichzeitiger Veränderung des Rückegassenabstandes

In diesem Versuch werden in den drei unterschiedlichen Bestandesszenarien drei Waldarbeiter zur Durchführung der Holzernte simuliert. Dabei besitzt Arbeiter 1 einen Zeitgrad von 70, Arbeiter 2 einen Zeitgrad von 100 und Arbeiter 3 einen Zeitgrad von 130. Das bedeutet, dass die drei dargestellten Arbeiter unterschiedlich leistungsfähig sind. Während Arbeiter 1 als leistungsschwach einzustufen ist, gilt Arbeiter 3 als sehr leistungsfähig. Arbeiter 2 erbringt die im EST festgelegte Normalleistung.
Hinsichtlich der Auswertung werden im weiteren Verlauf nur kurz die Ergebnisse zu den Systemparametern „Geerntete Holzmenge“, „TAP“ und „Kosten pro Festmeter“ näher betrachtet, da auf diese Weise die wichtigsten Verhaltensweisen des Modells dargestellt werden können.

Auswirkungen auf die geerntete Holzmenge pro Waldarbeiter	
Ausgangssituation System Motormanuelle Holzernte	Mit Ausnahme des Parameters „Zeitgrad“ bleiben sämtliche Einstellungen bei allen Simulationsläufen unverändert.
Hypothese 1	Es wird erwartet, dass die unterschiedliche Einstellung des Zeitgrades der Waldarbeiter in diesem Fall dazu führt, dass 1. Arbeiter 1 (Zeitgrad 70) die geringste Menge Holz erntet, dass 2. Arbeiter 2 (Zeitgrad 100) mehr Holz erntet als Arbeiter 1, aber weniger als Arbeiter 3, und dass 3. Arbeiter 3 die größte Holzmenge erntet.
Hypothese 2	Im Bezug auf die Erhöhung der Rückegassenabstände von 20 m auf 40 m wurde bereits nachgewiesen, dass die zu erntende Holzmenge mit zunehmendem Gassenabstand zunimmt.

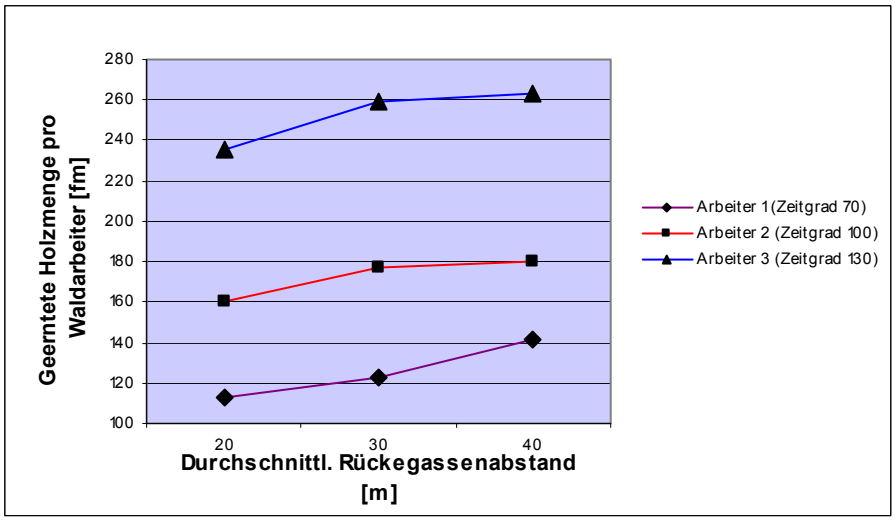


Abbildung 110: Auswirkung der Veränderung des Zeitgrades bei drei Waldarbeitern auf die geerntete Holzmenge pro Arbeiter bei gleichzeitiger Erhöhung des Rückegassenabstandes von 20 m auf 40 m

Die genauen Simulationsergebnisse sind in Anhang V aufgeführt.

Wie erwartet ist am Ergebnis der Versuchsläufe zu sehen, dass Arbeiter 3, also der mit einem Zeitgrad von 130 versehene Arbeiter in allen drei Modellszenarien die größte Holzmenge aufarbeitet (s. Abbildung 110). Entsprechend der Zeitgradeinstellungen folgen dann die Arbeiter 2 und 1.

Auswirkungen auf die Technische Arbeitsproduktivität (TAP) pro Waldarbeiter	
Ausgangssituation System Motormanuelle Holzernte	Mit Ausnahme des Parameters „Zeitgrad“ bleiben sämtliche Einstellungen bei allen Simulationsläufen unverändert.
Hypothese 1	Es wird erwartet, dass die unterschiedliche Einstellung des Zeitgrades der Waldarbeiter in diesem Fall dazu führt, dass 1. Arbeiter 1 (Zeitgrad 70) die geringste TAP besitzt, dass 2. Arbeiter 2 (Zeitgrad 100) eine höhere TAP als Arbeiter 1, aber eine geringere als Arbeiter 3 besitzt, und dass 3. Arbeiter 3 die größte TAP besitzt.
Hypothese 2	Im Bezug auf die Erhöhung der Rückegassenabstände von 20 m auf 40 m lässt sich hinsichtlich der TAP auch in diesem Fall keine konkrete Hypothese formulieren.

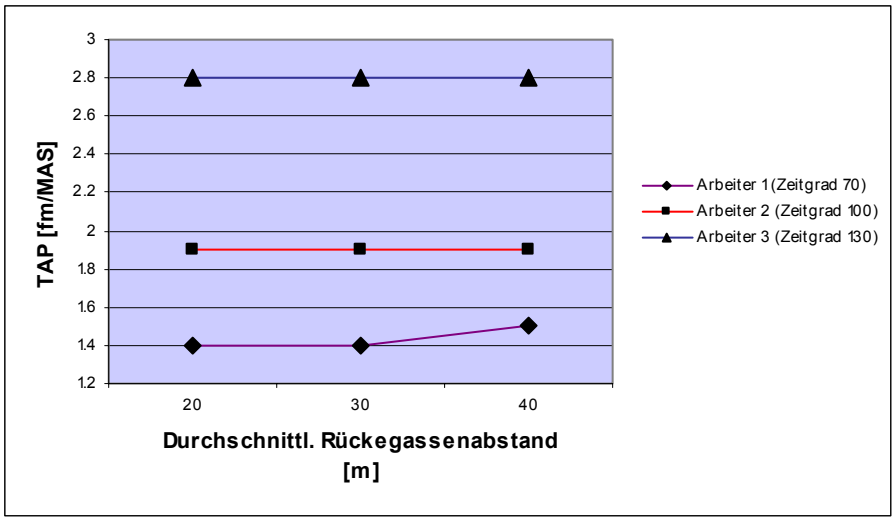


Abbildung 111: Auswirkung der Veränderung des Zeitgrades bei drei Waldarbeitern auf die Technische Arbeitsproduktivität (TAP) pro Arbeiter bei gleichzeitiger Erhöhung des Rückegassenabstandes von 20 m auf 40 m

Arbeiter 3 liegt in allen drei Bestandesszenarien mit einer TAP von 2,8 deutlich über den Werten von Arbeiter 2 (TAP 1,9) und Arbeiter 1 (etwa 1,4). Das bedeutet, dass Arbeiter 3 in einer Maschinenarbeitsstunde doppelt so viele Festmeter Holz aufarbeitet wie Arbeiter 1 (s. Abbildung 111). Bezüglich der veränderten Rückegassenabstände ist zu sagen, dass sich die TAP bei allen drei Waldarbeitern nicht verändert. Der Ausreißer in der TAP von Arbeiter 1 bei der 40 m-Variante erklärt

sich durch die im Vergleich mit den anderen beiden Erschließungsszenarien um etwa 2,2 % größere Holzmenge, die der Arbeiter in diesem Fall geerntet hat. Seine TAP erhöht sich dadurch von 1,4 auf 1,5 fm pro MAS. Da die Arbeiter ihren jeweils nächsten Erntebaum unter Berücksichtigung des Sicherheitsabstandes zu ihren Kollegen auswählen, kann es passieren, dass ein Arbeiter einige Bäume weniger bearbeitet, ein anderer dafür einige mehr. Zu dieser Situation kommt es also bei einem Abstand von 40 m, bei dem Arbeiter 1 durch seine etwas höhere TAP den kleinen „Leistungseinbruch“ von Arbeiter 2 und Arbeiter 3 ausgleicht.

Auswirkungen auf die Kosten pro Festmeter (€) pro Waldarbeiter	
Ausgangssituation System Motormanuelle Holzernte	Mit Ausnahme des Parameters „Zeitgrad“ bleiben sämtliche Einstellungen bei allen Simulationsläufen unverändert.
Hypothese 1	Es wird erwartet, dass die unterschiedliche Einstellung des Zeitgrades der Waldarbeiter in diesem Fall dazu führt, dass 1. Arbeiter 1 (Zeitgrad 70) die höchsten Festmeterkosten produziert, dass 2. Arbeiter 2 (Zeitgrad 100) geringere Kosten als Arbeiter 1, aber höhere als Arbeiter 3 verursacht, und dass 3. Arbeiter 3 die geringsten Kosten zu verantworten hat.
Hypothese 2	Im Bezug auf die Erhöhung der Rückegassenabstände von 20 m auf 40 m lässt sich hinsichtlich der fm-Kosten keine konkrete Hypothese formulieren. Es wird aber davon ausgegangen, dass der Verlauf der Kosten stark mit den Ergebnissen der Untersuchungen zur Technischen Arbeitsproduktivität zusammenhängt.

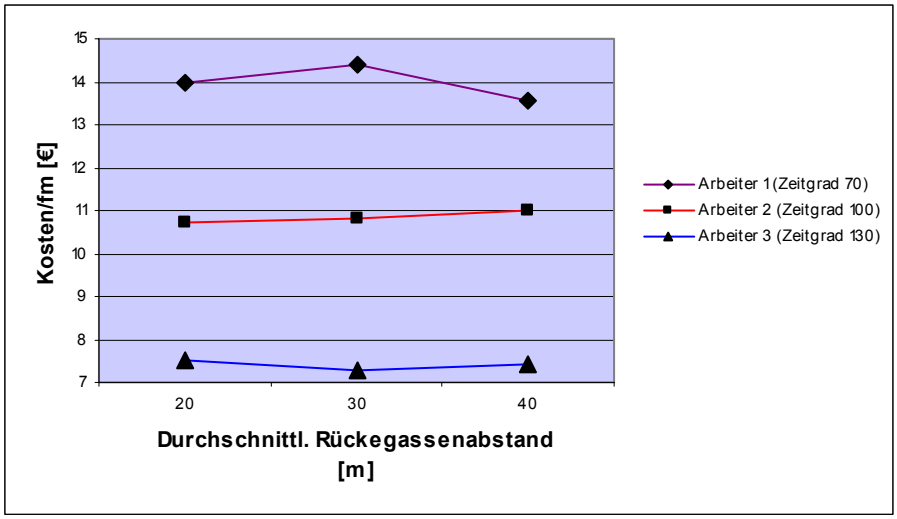


Abbildung 112: Auswirkung der Veränderung des Zeitgrades bei drei Waldarbeitern auf die Kosten pro Festmeter pro Arbeiter bei gleichzeitiger Erhöhung des Rückegassenabstandes von 20 m auf 40 m

Der Kostenverlauf spiegelt das Ergebnis der Untersuchungen zur TAP wider (s. Abbildung 112). Arbeiter 1 verursacht aufgrund seiner geringen Produktivität mit Abstand die höchsten Festmeterkosten. Dagegen verrichtet Arbeiter 3 seine Aufgabe am kostengünstigsten.

Kurzzusammenfassung der Ergebnisse von Versuchsreihe 2 (Motormanuelle Holzernte):

Drei Waldarbeiter, die jeweils einen **Zeitgrad von 70, 100 und 130** besitzen, liefern mit ihrer individuellen Leistungsfähigkeit unterschiedliche Ergebnisse. Der **produktivste Arbeiter bewältigt die größte Erntemenge**, der leistungsschwächste Arbeiter die niedrigste. Entsprechend ist auch der Verlauf der TAP für alle drei, was sich wiederum in den Kosten pro Festmeter je Arbeiter niederschlägt.
Die **Ausweitung der Gassenabstände** bringt trotz zunehmender Anzahl an Erntebäumen aufgrund der im EST festgelegten Grundproduktivität **keine Leistungssteigerung**.

7.3 Versuche mit dem Arbeitssystem Forwarder

Im Rahmen der im Folgenden beschriebenen Versuchsreihen zum Arbeitssystem Forwarder sollen einleitend einige wichtige Einfluss- und Ergebnisgrößen und ihre Beziehungen zueinander erläutert werden (s. Abbildung 113).

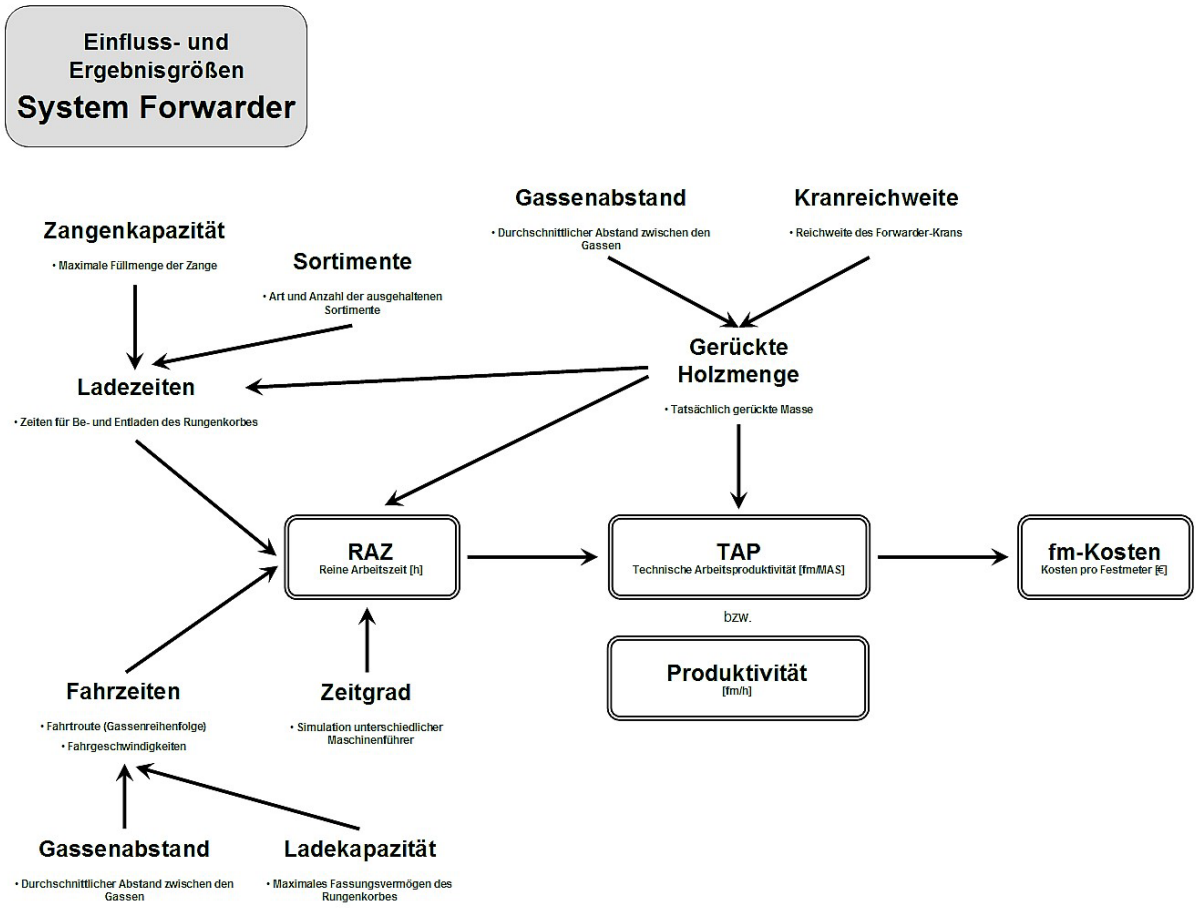


Abbildung 113: Einfluss- und Ergebnisgrößen für das System Forwarder

Auch in diesem Fall sind die Reine Arbeitszeit (RAZ), die Technische Arbeitsproduktivität (TAP) und die Kosten pro Festmeter als wichtigste Größen bei einer Entscheidungsfindung zu nennen. Im Vergleich zu den in Kapiteln 7.1 und 7.2 durchgeführten Versuchen, wirken sich beim Forwarder aber noch zusätzliche Einflussfaktoren auf die Leistung aus. Zu nennen sind hier die Lade- und die Zangenkapazität der Maschine.

Bei der Ladekapazität handelt es sich um die potenziell maximal aufladbare Holzmenge. Sie wird in Erntefestmeter mit Rinde angegeben und bestimmt das Ende eines Beladezyklus. Das bedeutet, dass im Modell bei Erreichen der vorab eingestellten, maximalen Transportkapazität der Ladevorgang automatisch beendet wird und die Maschine zum nächstgelegenen Polterplatz fährt, um sich dort zu entladen.

Dagegen bezieht sich die Zangenkapazität (m^2) lediglich auf den in der Zange des Forwarders maximal zur Verfügung stehenden Raum, der bei Be- und Entladeprozessen mit Abschnitten ausgefüllt werden kann.

7.3.1 Versuchsreihe 1: Auswirkungen von Veränderungen der Ladekapazität des Forwarders auf verschiedene Systemparameter bei gleichzeitiger Veränderung des Rückegassenabstandes

Auswirkungen auf die Reine Arbeitszeit (RAZ)	
Ausgangssituation System Forwarder	Mit Ausnahme des Parameters „Ladekapazität“ bleiben sämtliche Einstellungen bei allen Simulationsläufen unverändert.
Hypothese 1	Es wird erwartet, dass eine Veränderung der Ladekapazität des Forwarders (ausgehend von 10 fm Ladekapazität) in diesem Fall dazu führt, dass 1. durch eine Erhöhung der Ladekapazität auf bis zu 13 fm die Reine Arbeitszeit [h] der Maschine abnimmt, und dass 2. durch eine Verminderung der Ladekapazität auf bis zu 7 m die Reine Arbeitszeit [h] zunimmt.
Hypothese 2	Im Bezug auf die Erhöhung der Rückegassenabstände von 20 m auf 40 m wird erwartet, dass die Reine Arbeitszeit schrittweise zunimmt, da sich mit zunehmendem Abstand die Anzahl der Erntebäume und damit auch die Anzahl der zu rückenden Abschnitte erhöht.

Die genauen Simulationsergebnisse sind in Anhang VI aufgeführt.

Auswertung

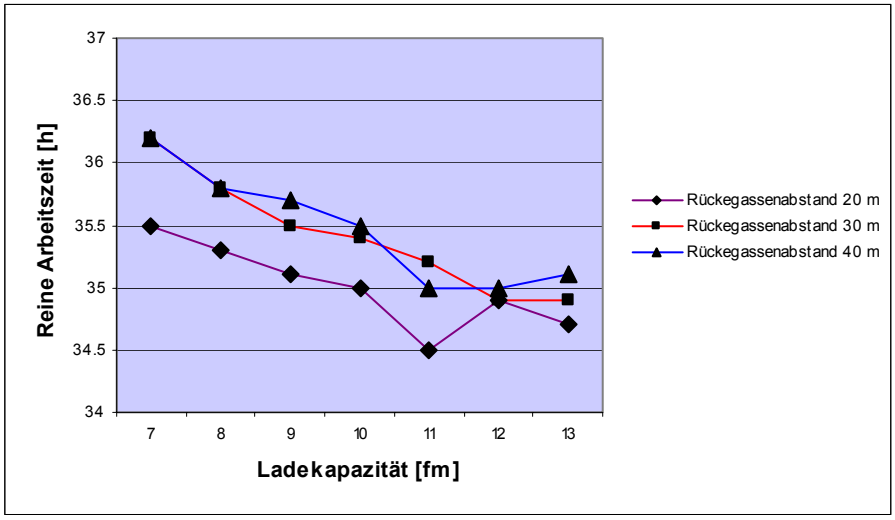


Abbildung 114: Auswirkung der Veränderung der Ladekapazität des Forwarders auf die Reine Arbeitszeit (RAZ) bei gleichzeitiger Erhöhung des Rückegassenabstandes von 20 m auf 40 m

Betrachtet man die Auswirkungen einer Ladekapazitätserhöhung, ist in allen drei Szenarien eine Minderung der RAZ erkennbar (s. Abbildung 114). Je mehr Masse der Forwarder mit einer Fuhre transportieren kann, umso geringer wird die Anzahl an Fuhren insgesamt. Die Maschine muss also weniger Fuhren durchführen, um die gesamte Holzmenge zu rücken. Dies führt zu einer Absenkung der RAZ. Beispielsweise konnte bei einem Gassenabstand von 20 m durch die Erhöhung der Ladekapazität von sieben auf dreizehn Festmeter eine Reduktion der RAZ um 0,8 h erreicht werden.

Dieser Wert erscheint auf den ersten Blick nicht sonderlich hoch, allerdings muss dabei beachtet werden, dass der Forwarder, wenn er voll beladen ist, automatisch zum nächstgelegenen Polterplatz fährt. Im aktuellen Modell existieren insgesamt vier dieser Plätze, was dazu führt, dass die Maschine von jedweder Position im Bestand aus nur eine relativ kurze Fahrtstrecke zurücklegen muss, bis sie mit dem Entladen beginnen kann. Bei größeren Distanzen zwischen Bestand und Polterplätzen würde der zeitliche Unterschied deutlicher ausfallen.

In den Versuchsreihen zum System Harvester (vgl. Kapitel 7.1) wurde schon der Effekt beschrieben, den eine Ausweitung des Rückegassenabstandes auf die Anzahl der zu erntenden Bäume hat. Bei Abständen von 30 m und 40 m werden, im Vergleich zur Variante mit 20 m, 9,7 % bzw. 14,8 % mehr Bäume für eine Ernte ausgewählt. Das in Abbildung 114 dargestellte Ergebnis fällt allerdings nicht so deutlich aus. Zwar besitzt die 20 m-Variante die geringsten RAZ-Werte, allerdings gibt es bei den Modelltypen mit 30 m und 40 m Überschneidungen der Graphen. Die Schwankungen sind gering (maximal 30 Minuten) und werden durch die insgesamt relativ kurzen RAZ-Gesamtwerte hervorgerufen. Dabei kann es – wie im Fall von Ladekapazität 11 fm, Gassenabstand 20 m – vorkommen, dass bei einer bestimmten Ladekapazität mit einer „optimalen Fuhrenanzahl“ gerückt werden kann, in den meisten anderen aber nicht. Das bedeutet, die Maschine wird mit ihrer letzten Fuhre exakt mit den Rückearbeiten fertig, wobei der Rungenkorb voll beladen ist. In vielen Fällen bleiben allerdings zum Ende der Rückung nur noch einige wenige Abschnitte im Bestand liegen, die dann noch einmal mit einer zusätzlichen Fuhre aus dem Bestand herausgefahren werden müssen. Diese zusätzliche Fuhre bzw. die dafür aufzubringende Fahrzeit erhöht dann noch einmal die RAZ und senkt gleichzeitig die TAP des Forwarders. Wie bereits erwähnt sind die zeitlichen Schwankungen relativ gering, müssen aber berücksichtigt werden. Mit zunehmendem Gassenabstand nimmt, über die gesamte Versuchsreihe betrachtet, auch die RAZ zu, da eine größere Anzahl an Abschnitten gerückt werden muss.

In zusätzlich durchgeführten Versuchen wird nun überprüft, ob sich der in dieser Versuchsreihe beobachtete Trend fortsetzt bzw. sogar verstärkt auftritt, wenn die Anzahl der Erntebäume wie folgt erhöht wird (s. Tabelle 53):

Tabelle 53: Erweiterte Anzahl an Erntebäumen zum Vergleich mit den Ergebnissen der ursprünglichen Bestände

	20 m RG-Abstand	30 m RG-Abstand	40 m RG-Abstand
Anzahl zu entnehmender Bäume bisher [Stk.]	1085	1190	1245
Erweiterte Anzahl zu entnehmender Bäume [Stk.]	2232	3437	3750
Zunahme an Erntebäumen [%]	99.9	188.9	201.2

Die Erhöhung der Erntebaumzahlen führt zu einer verstärkten Ausprägung der beobachteten Trends. Die RAZ nimmt durch die Erhöhung der Ladekapazität bei allen drei Szenarien ab. Bei einem Gassenabstand von 20 m wird durch die Erhöhung der Ladekapazität von sieben auf dreizehn Festmeter eine Reduktion der RAZ um 1,9 h erreicht (s. Abbildung 115). Ausreißer sind nicht mehr zu beobachten, da bei der großen Anzahl zu rückender Abschnitte eine zusätzliche Fuhre nicht mehr so stark ins Gewicht fällt, wie bei der zuvor untersuchten Versuchsreihe. Außerdem wird die proportional

zur Zunahme der Gassenabstände erhöhte RAZ noch ausgeprägter deutlich. Bei 20 m Gassenabstand fällt sie mit Abstand am niedrigsten aus, bei 40 m liegen die größten Werte.

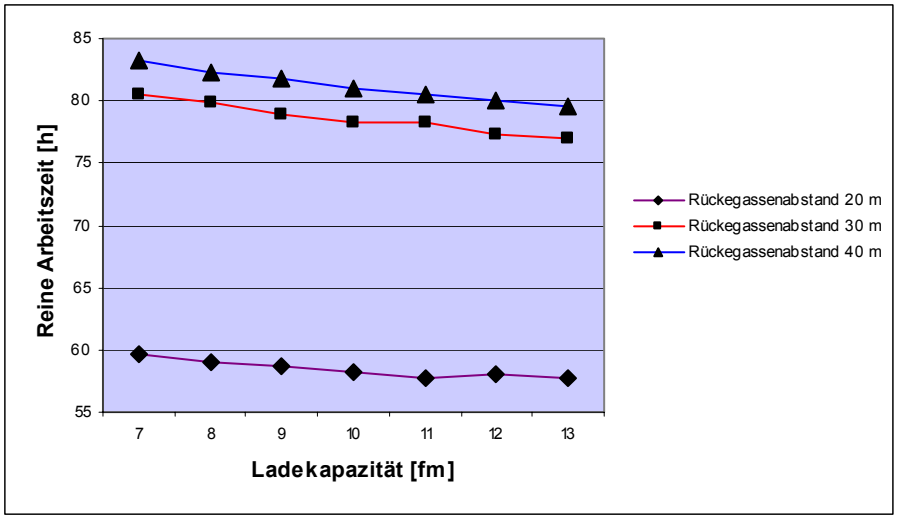


Abbildung 115: Auswirkung der Veränderung der Ladekapazität des Forwarders auf die Reine Arbeitszeit (RAZ) bei gleichzeitiger Erhöhung des Rückegassenabstandes von 20 m auf 40 m und zusätzlich erhöhter Erntebaumanzahl

Auswirkungen auf die Produktivität [fm/h]	
Ausgangssituation System Forwarder	Mit Ausnahme des Parameters „Ladekapazität“ bleiben sämtliche Einstellungen bei allen Simulationsläufen unverändert.
Hypothese 1	Es wird erwartet, dass eine Veränderung der Ladekapazität des Forwarders (ausgehend von 10 fm Ladekapazität) in diesem Fall dazu führt, dass 1. durch eine Erhöhung der Ladekapazität auf bis zu 13 fm die Produktivität [fm/h] der Maschine zunimmt, und dass 2. durch eine Verminderung der Ladekapazität auf bis zu 7 fm die Produktivität [fm/h] abnimmt.
Hypothese 2	Im Bezug auf die Erhöhung der Rückegassenabstände von 20 m auf 40 m ist zu erwarten, dass die Produktivität kontinuierlich zunimmt.

Auswertung

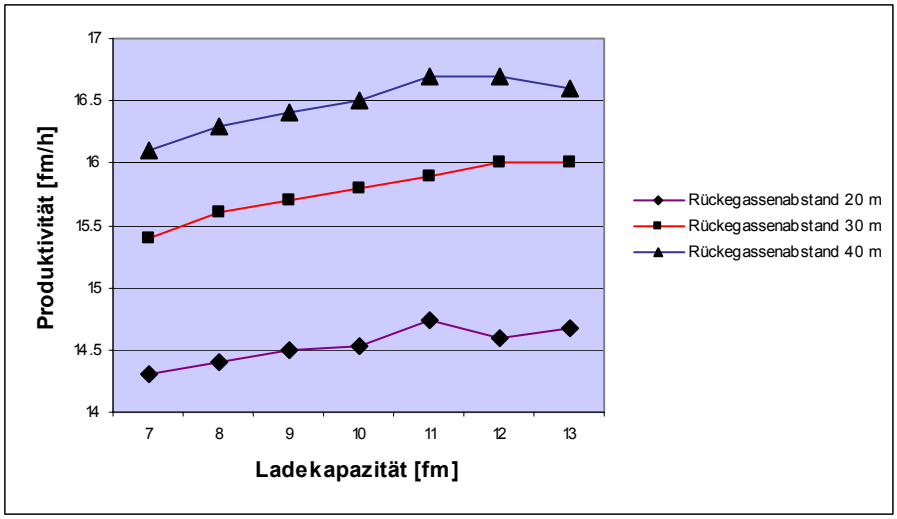


Abbildung 116: Auswirkung der Veränderung der Ladekapazität des Forwarders auf die Produktivität bei gleichzeitiger Erhöhung des Rückegassenabstandes von 20 m auf 40 m

Die Erweiterung der Ladekapazität des Forwarders bewirkt eine Erhöhung sämtlicher Produktivitätswerte (s. Abbildung 116). Die Produktivität wird durch Berechnung des Quotienten aus der tatsächlich geernteten Holzmenge, angegeben in Festmeter [fm] und der für diesen Eingriff aufgewendeten Reinen Arbeitszeit ermittelt. Ein Anheben der Ladekapazität hat zur Folge, dass die Maschine weniger Fuhren benötigt, um das anfallende Holz zu rücken. Somit reduzieren sich die Fahrzeitanteile, die Produktivität steigt an.

Wie bereits erwähnt, führt die Erhöhung der Rückegassenabstände zu einer „Zunahme“ von Erntebäumen bzw. von Abschnitten. Das bedeutet, dass der Forwarder insgesamt mehr Holz rücken, dabei aber gleichzeitig durch die Abnahme der Rückegassenanzahl immer weniger Fahrstrecken bewältigen muss. Somit steigt der Anteil von produktiv eingesetzter Zeit für Be- und Entladevorgänge im Verhältnis zu den mit unproduktivem Fahren verbrauchten Zeiten an.

Auswirkungen auf die Kosten pro Festmeter [€]	
Ausgangssituation System Forwarder	Mit Ausnahme des Parameters „Ladekapazität“ bleiben sämtliche Einstellungen bei allen Simulationsläufen unverändert.
Hypothese 1	Es wird erwartet, dass eine Veränderung der Ladekapazität des Forwarders (ausgehend von 10 fm Ladekapazität) in diesem Fall dazu führt, dass 1. durch eine Erhöhung der Ladekapazität auf bis zu 13 fm die Kosten pro Festmeter [€] abnehmen, und dass 2. durch eine Verminderung der Ladekapazität auf bis zu 7 fm die Kosten pro Festmeter [€] zunehmen.
Hypothese 2	Im Bezug auf die Erhöhung der Rückegassenabstände von 20 m auf 40 m wird erwartet, dass die Kosten pro Festmeter abnehmen.

Auswertung

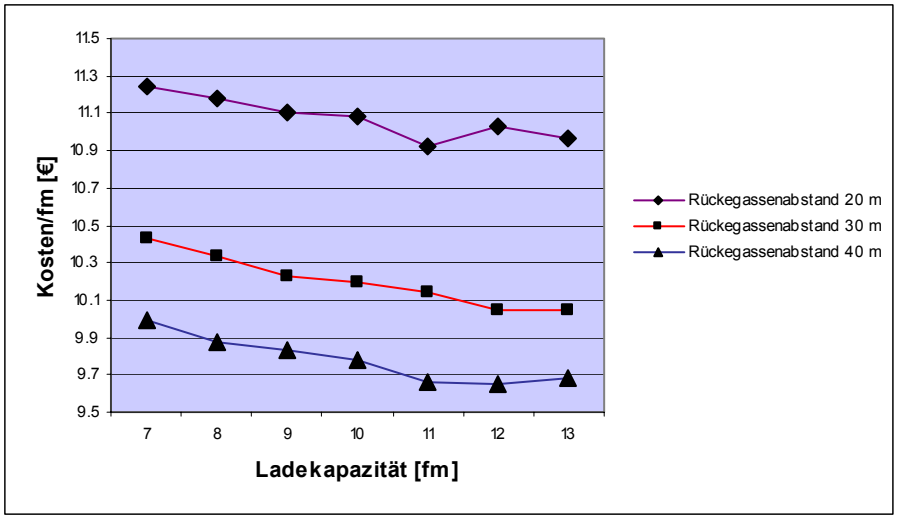


Abbildung 117: Auswirkung der Veränderung der Ladekapazität des Forwarders auf die Kosten pro Festmeter bei gleichzeitiger Erhöhung des Rückegassenabstandes von 20 m auf 40 m

Der Verlauf der Kurven spiegelt die zuvor bei der Produktivität beobachteten Ergebnisse wider (s. Abbildung 117). Die Kosten pro Festmeter sinken mit zunehmender Erhöhung der Ladekapazität bzw. der Produktivität. Ebenso führt eine Anhebung der Gassenabstände zu Kostensenkungen, da auch in diesem Fall die Produktivität zunimmt. Die teilweise auftretenden Schwankungen sind Ausdruck der im Zusammenhang mit den RAZ-Ergebnissen bereits besprochenen Einflussfaktoren „kurze RAZ“ und „optimale Fuhrenanzahl“.

Auswirkungen auf den Zeitanteil für das Befahren der Gassen und Wege an der RAZ	
Ausgangssituation System Forwarder	Mit Ausnahme des Parameters „Ladekapazität“ bleiben sämtliche Einstellungen bei allen Simulationsläufen unverändert.
Hypothese 1	Es wird erwartet, dass eine Veränderung der Ladekapazität des Forwarders (ausgehend von 10 fm Ladekapazität) in diesem Fall dazu führt, dass 1. durch eine Erhöhung der Ladekapazität auf bis zu 13 fm der Zeitanteil für das Befahren der Gassen und Wege abnimmt, und dass 2. durch eine Verminderung der Ladekapazität auf bis zu 7 fm der Zeitanteil für das Befahren der Gassen zunimmt.
Hypothese 2	Im Bezug auf die Erhöhung der Rückegassenabstände von 20 m auf 40 m wird erwartet, dass der Zeitanteil für das Befahren der Gassen abnimmt.

Auswertung

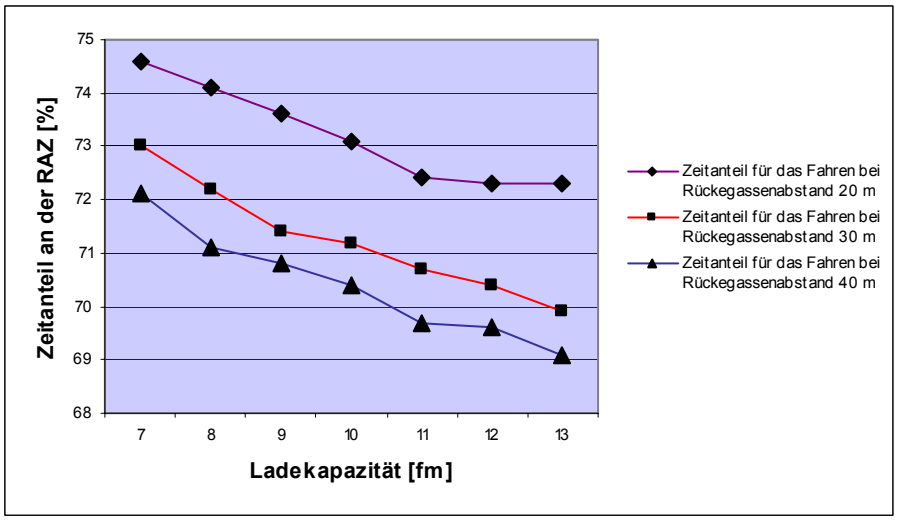


Abbildung 118: Auswirkung der Veränderung der Ladekapazität des Forwarders auf das Verhältnis des Zeitanteils für das Befahren der Gassen und Wege an der RAZ bei gleichzeitiger Erhöhung des Rückegassenabstandes von 20 m auf 40 m

Eine Ausweitung bzw. Reduzierung der Ladekapazität bewirkt, dass der Forwarder entweder mehr bzw. weniger Fuhren benötigt, um das geerntete Holz zu rücken. Diesen Effekt erkennt man bei Betrachtung von Abbildung 118. Mit steigender Ladekapazität sinken die Zeitanteile an der RAZ für das Fahren auf Gassen und Wegen.
Auch Hypothese 2 hat sich bewahrheitet. Die mit steigendem Abstand abnehmende Anzahl von Rückegassen führt zu einem immer geringeren Anteil der Fahrzeiten an der RAZ.

Kurzzusammenfassung der Ergebnisse von Versuchsreihe 1 (Forwarder):

Über insgesamt sieben Stufen hinweg wurde die **Ladekapazität** des Forwarders bei gleich bleibender zu rückender Holzmasse **von 7 fm auf 13 fm erhöht**. Das Ergebnis zeigt die erwarteten Effekte:
Die **RAZ nimmt** kontinuierlich **ab**, die **Produktivität steigt an**, was wiederum die **Kosten reduziert**. Gleichzeitig **geht der Zeitanteil für das Fahren** im Bestand **zurück**, da die Maschine immer weniger Fuhren benötigt, um ihre Arbeit zu bewältigen.
Der Einfluss der unterschiedlich breiten Abstände zwischen den einzelnen Rückegassen wird ebenfalls deutlich, **da der Forwarder bei größeren Abständen von 30 m und 40 m immer mehr Holz vorrücken muss**.

7.3.2 Versuchsreihe 2: Auswirkungen von Veränderungen des Zeitgrades des Forwarders auf verschiedene Systemparameter bei gleichzeitiger Veränderung des Rückegassenabstandes

Auswirkungen auf die Reine Arbeitszeit (RAZ)	
Ausgangssituation System Forwarder	Mit Ausnahme des Parameters „Zeitgrad“ bleiben sämtliche Einstellungen bei allen Simulationsläufen unverändert.
Hypothese 1	Es wird erwartet, dass eine Veränderung des Zeitgrades des Forwarders (ausgehend von einem Zeitgrad 100) in diesem Fall dazu führt, dass 1. durch eine Erhöhung des Zeitgrades auf 130 die Reine Arbeitszeit [h] der Maschine abnimmt, und dass 2. durch eine Verminderung des Zeitgrades auf 70 die Reine Arbeitszeit [h] zunimmt.
Hypothese 2	Im Bezug auf die Erhöhung der Rückegassenabstände von 20 m auf 40 m wird erwartet, dass die Reine Arbeitszeit schrittweise zunimmt.

Die genauen Simulationsergebnisse sind in Anhang VII aufgeführt.

Auswertung

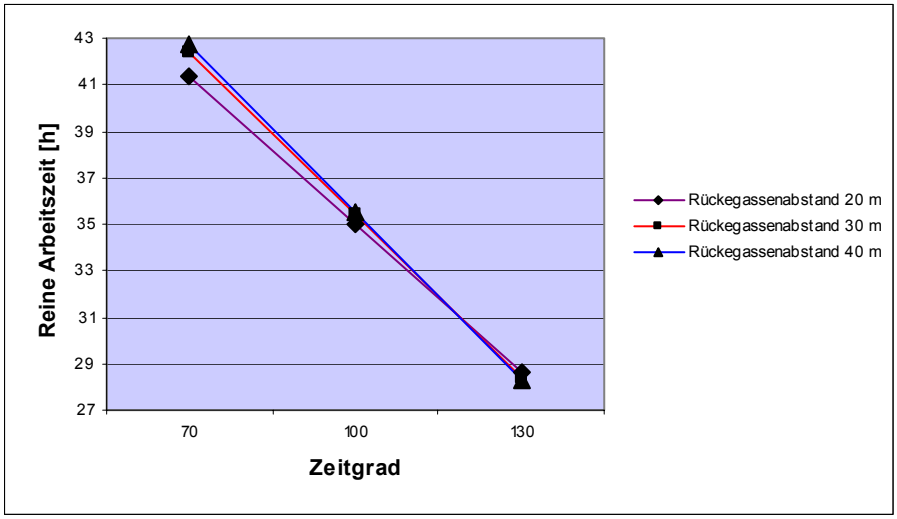


Abbildung 119: Auswirkung der Veränderung des Zeitgrades des Forwarders auf die Reine Arbeitszeit (RAZ) bei gleichzeitiger Erhöhung des Rückegassenabstandes von 20 m auf 40 m

Die Anhebung des Zeitgrades von 70 auf 100 und 130 führt bei allen drei Abstandsvarianten zu einer entsprechenden Senkung der RAZ (s. Abbildung 119). Bei einem Gassenabstand von 20 m kommt es dabei beispielsweise zu einer Reduktion von insgesamt 12,8 h.
Durch die größere Anzahl zu rückender Abschnitte steigt die RAZ mit zunehmendem Gassenabstand an. Damit kann auch Hypothese 2 verifiziert werden.

Auswirkungen auf das Verhältnis der Zeitanteile für die Kranarbeit sowie für das Befahren der Gassen und Wege an der RAZ	
Ausgangssituation System Forwarder	Mit Ausnahme des Parameters „Zeitgrad“ bleiben sämtliche Einstellungen bei allen Simulationsläufen unverändert.
Hypothese 1	Es wird erwartet, dass eine Veränderung des Zeitgrades des Forwarders (ausgehend von einem Zeitgrad 100) in diesem Fall dazu führt, dass 1. durch eine Erhöhung des Zeitgrades auf 130 der Zeitanteil für die Kranarbeit abnimmt, wobei gleichzeitig der Zeitanteil für das Befahren der Gassen proportional zunimmt, und dass 2. durch eine Verminderung des Zeitgrades auf 70 der Zeitanteil für die Kranarbeit zunimmt, wobei gleichzeitig der Zeitanteil für das Befahren der Gassen proportional abnimmt.

Auswertung

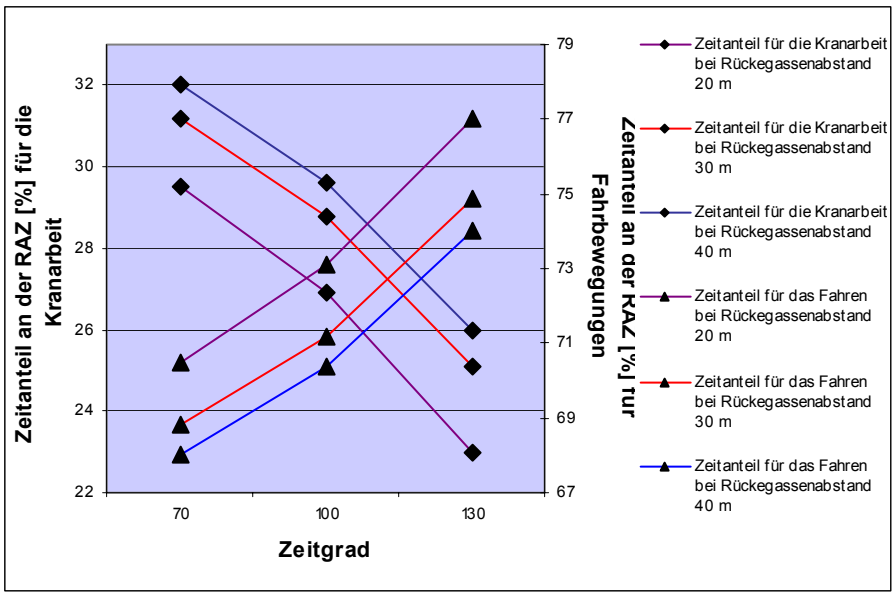


Abbildung 120: Auswirkung der Veränderung des Zeitgrades auf das Verhältnis der Zeitanteile für die Kranarbeit sowie für das Befahren der Wege und Gassen an der RAZ bei gleichzeitiger Erhöhung des Rückegassenabstandes von 20 m auf 40 m

Da eine Erhöhung des Zeitgrades zu einer Absenkung der für die Kranarbeit aufgewendeten Arbeitszeit führt, sinkt deren Anteil an der insgesamt verbrauchten RAZ entsprechend ab (s. Abbildung 120). Proportional dazu erhöht sich automatisch der Fahrzeitanteil, der durch die Zeitgradveränderung in seinem Wert allerdings unbeeinflusst bleibt.

Wie sich im Versuch zur allgemeinen Dauer der RAZ bereits gezeigt hat, bewirkt eine Ausdehnung des Rückegassenabstandes eine Erhöhung der RAZ. Dieser Effekt konnte auch bei dieser Versuchsreihe nachgewiesen werden.

Auswirkungen auf die Produktivität [fm/h]	
Ausgangssituation System Forwarder	Mit Ausnahme des Parameters „Zeitgrad“ bleiben sämtliche Einstellungen bei allen Simulationsläufen unverändert.
Hypothese 1	Es wird erwartet, dass eine Veränderung des Zeitgrades des Forwarders (ausgehend von einem Zeitgrad 100) in diesem Fall dazu führt, dass 1. durch eine Erhöhung des Zeitgrades auf 130 die Produktivität [fm/h] der Maschine zunimmt, und dass 2. durch eine Verminderung des Zeitgrades auf 70 die Produktivität [fm/h] abnimmt.
Hypothese 2	Im Bezug auf die Erhöhung der Rückegassenabstände von 20 m auf 40 m wir erwartet, dass die Produktivität ansteigt.

Auswertung

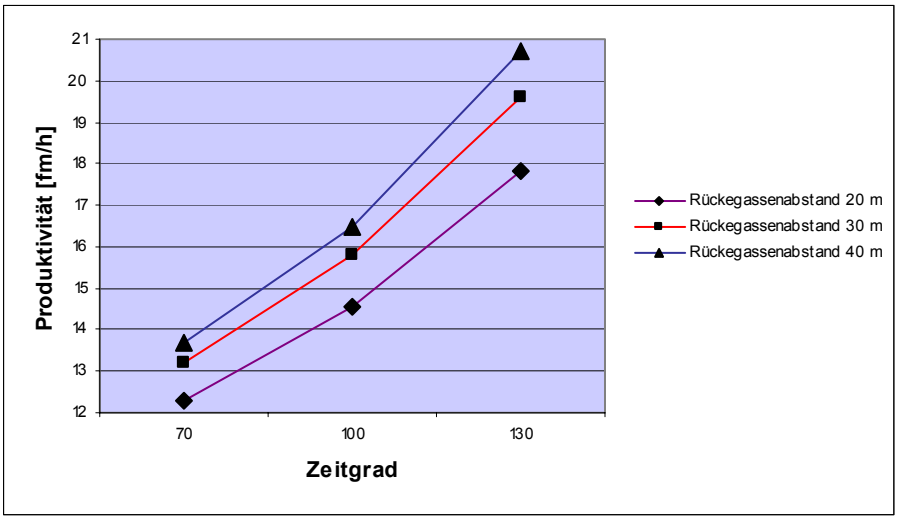


Abbildung 121: Auswirkung der Veränderung des Zeitgrades des Forwarders auf die Produktivität bei gleichzeitiger Erhöhung des Rückegassenabstandes von 20 m auf 40 m

Die Erhöhung des Zeitgrades hat zur Folge, dass weniger Zeit für die Kranarbeit aufgewendet wird, also die RAZ abnimmt (s. Abbildung 121). Dies bringt automatisch eine Steigerung der Produktivität mit sich. Ein mit einem Zeitgrad von 130 simulierter Maschinenführer arbeitet also produktiver als ein Fahrer mit einem Zeitgrad von 70 oder 100.

Die Ausweitung der Gassenabstände führt in diesem Modell zu einer steigenden Anzahl von Erntebäumen und damit zu mehr Stammabschnitten. Gleichzeitig verringert sich die Zahl an Rückegassen. Der Forwarder rückt also eine zunehmende Holzmenge bei abnehmender Länge der Fahrstrecken. Dadurch kommt es zu einer Produktivitätssteigerung.

Auswirkungen auf die Kosten pro Festmeter [€]	
Ausgangssituation System Forwarder	Mit Ausnahme des Parameters „Zeitgrad“ bleiben sämtliche Einstellungen bei allen Simulationsläufen unverändert.
Hypothese 1	Es wird erwartet, dass eine Veränderung des Zeitgrades des Forwarders (ausgehend von einem Zeitgrad 100) in diesem Fall dazu führt, dass 1. durch eine Erhöhung des Zeitgrades auf 130 die Kosten pro Festmeter [€] abnehmen, und dass 2. durch eine Verminderung des Zeitgrades auf 70 die die Kosten pro Festmeter [€] zunehmen.
Hypothese 2	Im Bezug auf die Erhöhung der Rückegassenabstände von 20 m auf 40 m wird erwartet, dass die Kosten pro Festmeter [€] abnehmen.

Auswertung

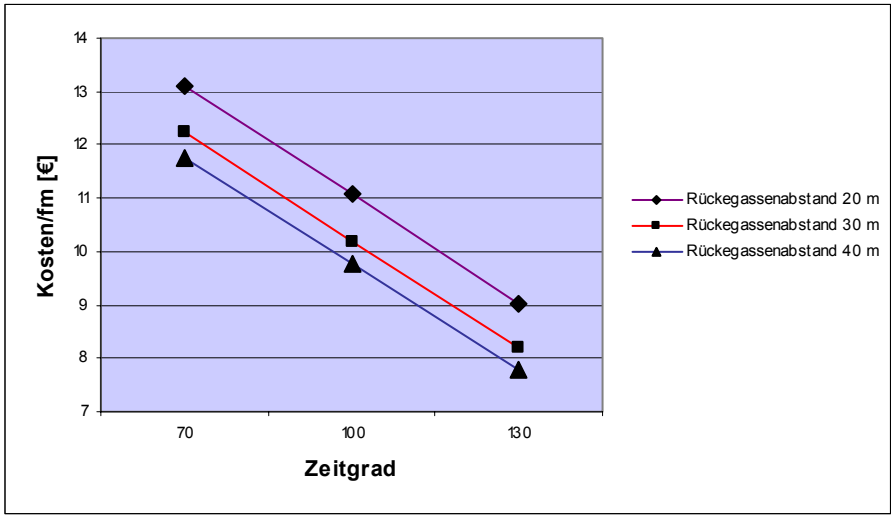


Abbildung 122: Auswirkung der Veränderung des Zeitgrades des Forwarders auf die Kosten pro Festmeter bei gleichzeitiger Erhöhung des Rückegassenabstandes von 20 m auf 40 m

Proportional zum beobachteten Verhalten der Produktivität sinken die Kosten pro Festmeter mit zunehmender Erhöhung des Zeitgrades ab (s. Abbildung 122). Ebenso bewirkt die Ausdehnung der Rückegassenabstände bedingt durch die damit verbundene höhere Produktivität eine Kostenreduzierung.

Kurzzusammenfassung der Ergebnisse von Versuchsreihe 2 (Forwarder):

Wie bei den beiden Arbeitssystemen zuvor, verursacht die **Erhöhung des Zeitgrades** von 70 auf 100 und 130 eine **Abnahme der RAZ**, einen **Anstieg der Produktivität** und damit verbunden eine **Senkung der Stückkosten**. Hinzu kommt, dass sich der **Zeitanteil** für die produktive **Kranarbeit verringert**, wobei sich automatisch der **Anteil** für das **Fahren erhöht**. Die aufgrund der **weiteren Gassenabstände** größere anfallende Holzmenge wirkt sich durch **steigende Produktivität** und **sinkende Kosten** aus.

7.3.3 Versuchsreihe 3: Auswirkungen von Veränderungen des Anteils der Maschinenarbeitsstunden (MAS) an der Gesamtarbeitszeit (GAZ) des Forwarders auf verschiedene Systemparameter bei gleichzeitiger Veränderung des Rückegassenabstandes

Wie schon beim System Harvester wird auch beim Forwarder untersucht, inwieweit die Änderung der MAS- bzw. AZ-Anteile an der GAZ Auswirkungen auf die Simulationsergebnisse hat. Die genaue Erklärung des hier eingesetzten Störzeitenmoduls findet sich in Kapitel 7.1 bei den Versuchen mit dem System Harvester.

Auswirkungen auf die Gesamtarbeitszeit (GAZ)	
Ausgangssituation System Forwarder	Mit Ausnahme des Parameters „MAS-Anteil an der GAZ“ bleiben sämtliche Einstellungen bei allen Simulationsläufen unverändert.
Hypothese 1	Es wird erwartet, dass eine Veränderung des Anteils der MAS an der GAZ des Forwarders in diesem Fall dazu führt, dass (ausgehend von einem Anteil von 50 %) durch eine Erhöhung dieses Anteils auf bis zu 100 % die GAZ der Maschine abnimmt.
Hypothese 2	Im Bezug auf die Erhöhung der Rückegassenabstände von 20 m auf 40 m wird erwartet, dass die GAZ schrittweise abnimmt.

Die genauen Simulationsergebnisse sind in Anhang VIII aufgeführt.

Auswertung

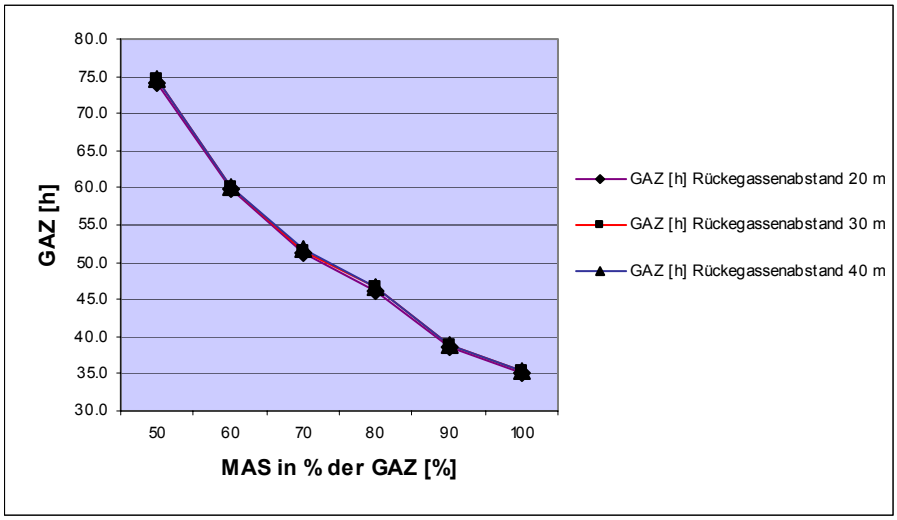


Abbildung 123: Auswirkung der Veränderung des MAS-Anteils an der GAZ des Forwarders auf die Gesamtarbeitszeit (GAZ) bei gleichzeitiger Erhöhung des Rückegassenabstandes von 20 m auf 40 m

Das Systemverhalten des Forwarders bei Anhebung der MAS-Anteile an der GAZ gleicht dem des Harvesters. Die GAZ sinkt stetig ab, da der Anteil der Allgemeinen Zeiten kontinuierlich abnimmt (s. Abbildung 123). Gleichzeitig ist zu beobachten, dass die Ausdehnung des Gassenabstandes zu keiner Veränderung der GAZ-Werte führt. Die Abweichungen sind so gering, dass sie graphisch nur schwer

darzustellen sind. Die durch den Wegfall der Rückegassen neu hinzugekommenen Erntebäume bzw. die daraus entstehenden Abschnitte bewirken keine allzu große Veränderung hinsichtlich der RAZ. Wie schon bei Versuchsreihe 1 gesehen, liegen die RAZ-Werte der einzelnen Erschließungsszenarien relativ nahe beieinander. Dieses Ergebnis ist im Hinblick auf die vorangegangenen Untersuchungen zur Reinen Arbeitszeit (RAZ) erwartet worden.

Auswirkungen auf den Anteil der Allgemeinen Zeiten (AZ) an der Gesamtarbeitszeit (GAZ)	
Ausgangssituation System Forwarder	Mit Ausnahme des Parameters „MAS-Anteil an der GAZ“ bleiben sämtliche Einstellungen bei allen Simulationsläufen unverändert.
Hypothese 1	Es wird erwartet, dass eine Veränderung des Anteils der MAS an der GAZ des Forwarders in diesem Fall dazu führt, dass (ausgehend von einem Anteil von 50 %) durch eine Erhöhung dieses Anteils auf bis zu 100 % der Anteil der Allgemeinen Zeiten (AZ) an der Gesamtarbeitszeit (GAZ) der Maschine abnimmt.
Hypothese 2	Im Bezug auf die Erhöhung der Rückegassenabstände von 20 m auf 40 m wird erwartet, dass der Anteil der Allgemeinen Zeiten (AZ) an der Gesamtarbeitszeit (GAZ) schrittweise zunimmt.

Auswertung

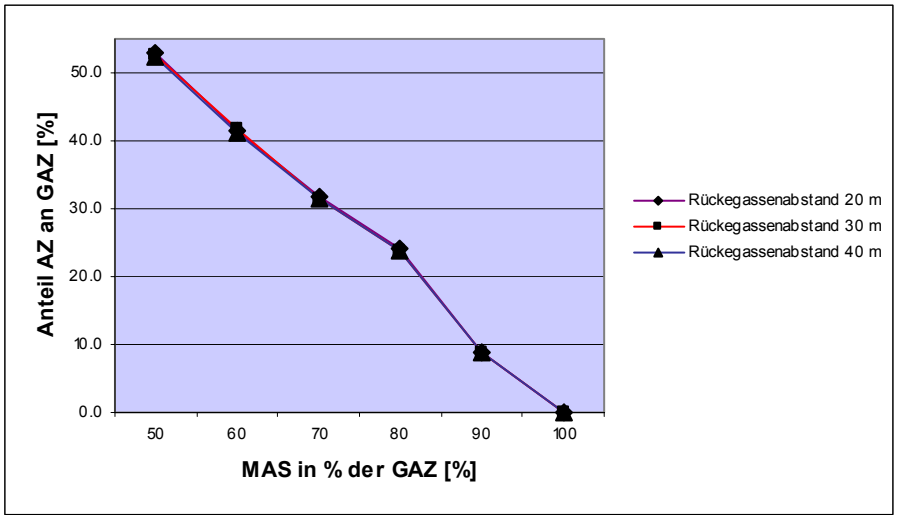


Abbildung 124: Auswirkung der Veränderung des MAS-Anteils an der GAZ des Forwarders auf den Anteil der Allgemeinen Zeiten (AZ) an der Gesamtarbeitszeit (GAZ) bei gleichzeitiger Erhöhung des Rückegassenabstandes von 20 m auf 40 m

Wie bereits im Versuch zuvor gezeigt, führt auch in diesem Beispiel die Erhöhung des Anteiles der MAS an der GAZ zu einer Reduktion des Anteils der AZ (s. Abbildung 124). Des Weiteren nimmt der Anteil der AZ an der GAZ mit zunehmendem Gassenabstand in sehr geringem Umfang ab, da bei einem Abstand von 40 m die RAZ, verglichen mit den Varianten 20 m und 30 m, stellenweise am höchsten ausfällt und daher der Anteil der AZ zunehmend etwas weniger ins Gewicht fällt.

Wie schon bei den Versuchen zum AZ-Anteil beim Harvester, werden auch beim Forwarder die Unterbrechungen in nahezu allen Fällen nicht so „exakt“ simuliert, dass die erwarteten Verhältnisse von MAS zu AZ (z.B. 80 %:20 %) eingehalten werden.

Auswirkungen auf die TAP [fm/MAS]	
Ausgangssituation System Forwarder	Mit Ausnahme des Parameters „MAS-Anteil an der GAZ“ bleiben sämtliche Einstellungen bei allen Simulationsläufen unverändert.
Hypothese 1	Es wird erwartet, dass eine Veränderung des Anteils der MAS an der GAZ des Forwarders in diesem Fall dazu führt, dass (ausgehend von einem Anteil von 50 %) durch eine Erhöhung dieses Anteils auf bis zu 100 % die TAP zunimmt.
Hypothese 2	Im Bezug auf die Erhöhung der Rückegassenabstände von 20 m auf 40 m wird erwartet, dass die TAP zunimmt.

Auswertung

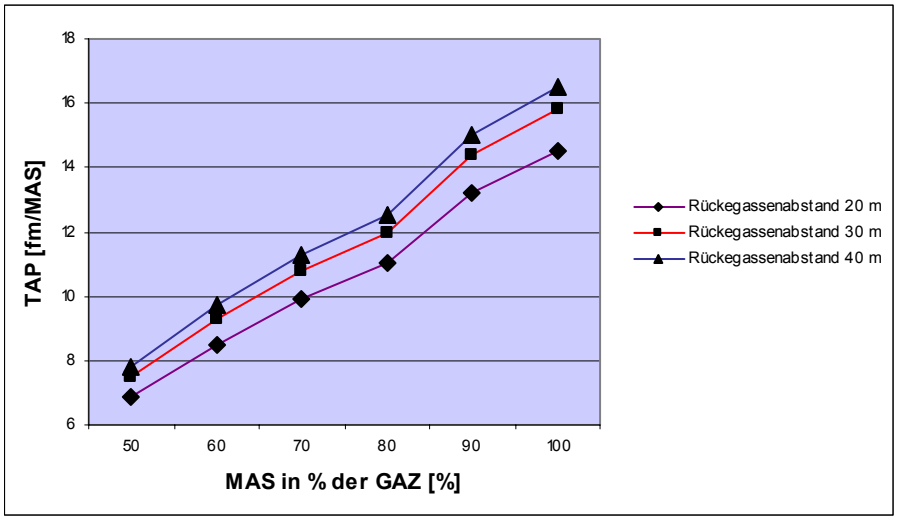


Abbildung 125: Auswirkung der Veränderung des MAS-Anteils an der GAZ des Forwarders auf die TAP bei gleichzeitiger Erhöhung des Rückegassenabstandes von 20 m auf 40 m

Durch die Absenkung des AZ-Anteils an der GAZ arbeitet das System auch in diesem Fall immer produktiver (s. Abbildung 125). Die Produktivität steigt mit zunehmendem Gassenabstand ebenfalls an. Die Ausweitung der Gassenabstände führt zu einer steigenden Anzahl zu rückender Abschnitte. Gleichzeitig verringert sich die Zahl an Rückegassen. Der Forwarder rückt also eine zunehmende Holzmenge bei abnehmender Länge der Fahrstrecken. Dieser Effekt wurde bereits bei den Auswirkungen der Veränderung des Zeitgrades beim Forwarder beobachtet.

Kurzzusammenfassung der Ergebnisse von Versuchsreihe 3 (Forwarder):

Durch **Simulation stetig abnehmender Störungs- und Pausenzeiten** mit Anteilen von 50 % bis zu, in der Realität nur sehr selten anzutreffenden 0 % an der **GAZ**, **sinken die Werte** für diese Gesamtarbeitszeit immer weiter ab, was die **TAP erhöht**.

7.4 Versuche mit dem Arbeitssystem Schlepper

Für das Arbeitssystem Schlepper sind bei der Auswertung der einzelnen Simulationsläufe diejenigen Einfluss- und Ergebnisgrößen, die in Abbildung 126 aufgeführt sind sowie ihre Beziehungen zueinander von besonderer Bedeutung.

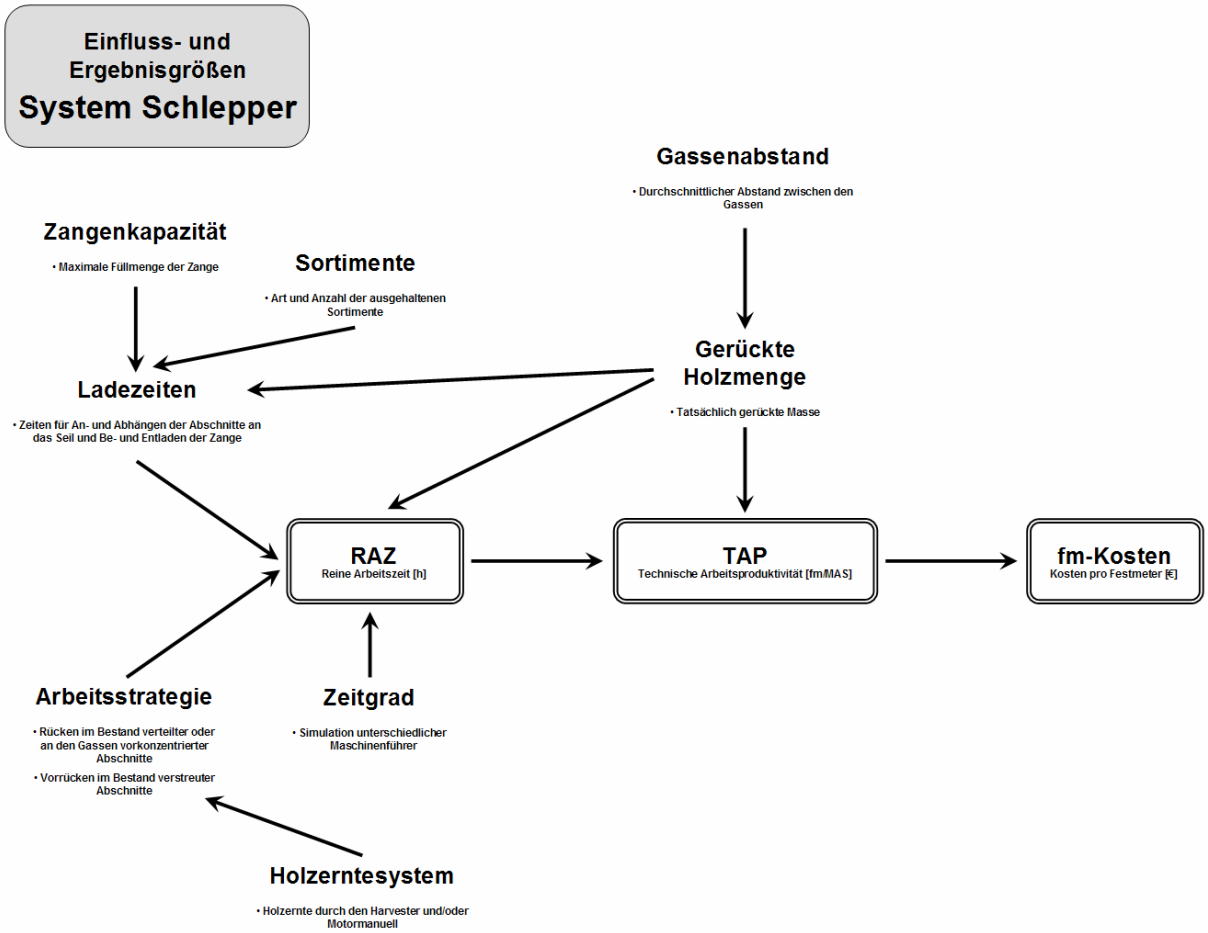


Abbildung 126: Einfluss- und Ergebnisgrößen für das System Schlepper

Reine Arbeitszeit (RAZ), Technische Arbeitsproduktivität (TAP) und Kosten pro Festmeter sind auch hier wieder die entscheidenden Einfluss- und Ergebnisgrößen, die man bei der Auswertung einer Simulation des Schleppers besonders beachten muss.

Wichtig für die Arbeitsstrategie des Schleppers ist die Art der zuvor durchgeführten Holzernte. Wurden die Bäume durch einen Harvester gefällt und aufgearbeitet, liegen die Abschnitte bereits vorkonzentriert an Rückegassen und Forststraßen. Waren aber Waldarbeiter an der Holzernte beteiligt, befinden sich die von ihnen produzierten Abschnitte im Bestand und müssen durch den Schlepper unter Einsatz einer Seilwinde vorgerückt werden. Danach kann er sie mit Hilfe des Seiles oder der Rückezange an die Waldstraße rücken.

Als drittes Szenario besteht noch die Möglichkeit, die Abschnitte im Anschluss an eine Motormanuelle Holzernte lediglich durch den Schlepper bis zur Gasse vorrücken zu lassen. Von dort könnte dann ein Forwarder die Rückung übernehmen. Die Auswahl der jeweiligen Arbeitsstrategie trifft der Nutzer im Frontend des Schleppers.

Eine weitere Einflussgröße ist die Zangenkapazität (m^2), die sich auf den in der Zange des Schleppers maximal zur Verfügung stehenden Raum bezieht, der bei der Rückung mit Abschnitten ausgefüllt werden kann. Dieser Wert ist für den Nutzer im Frontend des Schleppers zwar einstellbar, hat aber im Moment noch keinerlei Auswirkung auf die Simulation. Dies liegt an der Tatsache, dass der Zeitverbrauch des Schleppers für das Vorrücken und Rücken der einzelnen Abschnitte mit Hilfe eines speziellen Schleppertarifes des Landes Nordrhein-Westfalen berechnet wird. Dieser Tarif kalkuliert dabei die Dauer in Minuten pro Festmeter, die das Vorrücken bzw. Rücken eines bestimmten Abschnittes beträgt (s. Abbildung 127). Daher ist der Einfluss einer veränderten Zangenkapazität nicht darstellbar, da für den Schlepper im Unterschied zu den Systemen Harvester und Forwarder keine Einzelzeiten berechnet werden können. Es macht also keinen Unterschied, ob die Zange der Maschine zum Beispiel zwei oder vier Abschnitte greifen kann, da die mit dem Tarif errechnete Arbeitszeit für den gesamten Prozess der Vorrückung bzw. Rückung gilt.

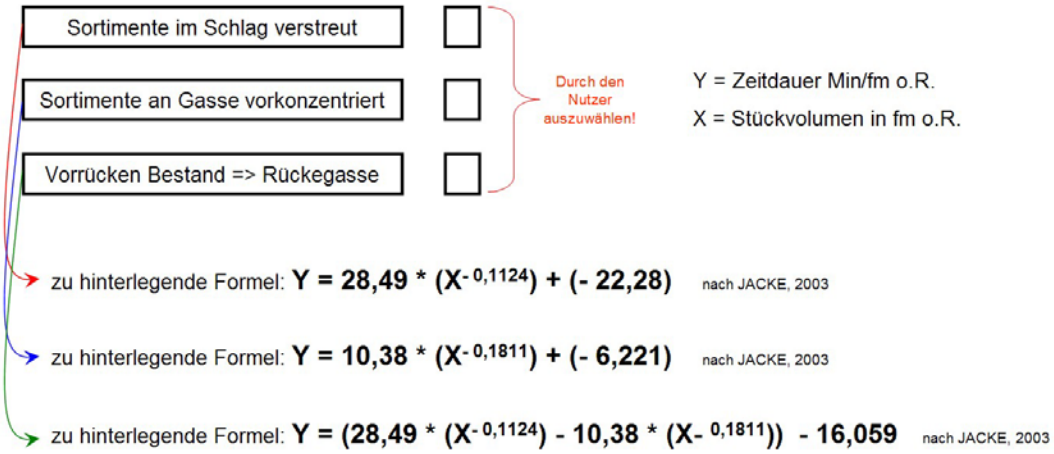


Abbildung 127: Struktur der verschiedenen Arbeitsstrategien des Schleppers

Die mit dem System Schlepper durchgeführten Versuche beziehen sich aufgrund der durch Einsatz des Tarifs „relativ starren“ Simulationsbedingungen im Wesentlichen auf die veränderbaren Größen „Arbeitsstrategie“ und „Zeitgrad“. Dabei wurden in den drei unterschiedlichen Modellen mit den festen Rückegassenabständen von 20 m, 30 m und 40 m alle drei möglichen Arbeitsstrategien (Vorrücken im Bestand verstreuter Abschnitte, Vorrücken im Bestand verstreuter Abschnitte + Rücken aus dem Bestand, Rücken von vorkonzentrierten Abschnitten) bei gleichzeitiger Variation des Zeitgrades mit den Werten 70, 100 und 130 simuliert. Die Ergebnisse zeigt Tabelle 54.

Tabelle 54: Simulationsergebnisse der Versuche mit dem System Schlepper

Arbeitsstrategie =>	Vorrücken im Bestand verstreuter Stammabschnitte und Rücken			Rücken an der Gasse vorkonzentrierter Stammabschnitte			Vorrücken im Bestand verstreuter Stammabschnitte		
	20 m RG-Abstand	30 m RG-Abstand	40 m RG-Abstand	20 m RG-Abstand	30 m RG-Abstand	40 m RG-Abstand	20 m RG-Abstand	30 m RG-Abstand	40 m RG-Abstand
Tatsächlich geerntete Holzmenge [fm]	**508.7**	**558.4**	**584**	**508.7**	**558.4**	**584**	**508.7**	**558.4**	**584**
Tatsächlich transportierte Holzmenge [fm] **(Zeitgrad 70)**	508.7	558.4	584	508.7	558.4	584	449	521.2	550.1
Verhältnis Transportierte Holzmenge - Geerntete Holzmenge [%]	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	88.3	93.3	94.2
MAS [h]	110	120.9	126.3	72	79.1	82.7	33.6	39	41.1
Anteil an den MAS mit Zeitgrad 100 [%]	130.0	130.0	130.0	130.0	130.0	130.0	130.0	130.0	130.0
TAP [fm/MAS]	4.6	4.6	4.6	7.1	7.1	7.1	13.4	13.4	13.4
Zurückgelegte Wegstrecke [km]	313.8	332.8	328.9	313.8	332.8	328.9	8.5	6.5	5.4
Fm-Kosten [€/fm]	12.6	12.61	12.6	8.25	8.25	8.25	4.36	4.35	4.35
Tatsächlich transportierte Holzmenge [fm] **(Zeitgrad 100)**	508.7	558.4	584	508.7	558.4	584	449	521.2	550.1
Verhältnis Transportierte Holzmenge - Geerntete Holzmenge [%]	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	88.3	93.3	94.2
MAS [h]	84.7	93	97.2	55.4	60.9	63.6	25.8	30	31.6
TAP [fm/MAS]	6	6	6	9.2	9.2	9.2	17.4	17.4	17.4
Zurückgelegte Wegstrecke [km]	313.8	332.8	328.9	313.8	332.8	328.9	8.5	6.5	5.4
Fm-Kosten [€/fm]	9.69	9.7	9.69	6.35	6.35	6.35	3.35	3.35	3.35
Tatsächlich transportierte Holzmenge [fm] **(Zeitgrad 130)**	508.7	558.4	584	508.7	558.4	584	449	521.2	550.1
Verhältnis Transportierte Holzmenge - Geerntete Holzmenge [%]	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	88.3	93.3	94.2
MAS [h]	59.3	65.1	68	38.8	42.6	44.5	18.1	21	22.1
Anteil an den MAS mit Zeitgrad 100 [%]	70.0	70.0	70.0	70.0	70.0	70.0	70.0	70.0	70.0
TAP [fm/MAS]	8.6	8.6	8.6	13.1	13.1	13.1	24.8	24.8	24.8
Zurückgelegte Wegstrecke [km]	313.8	332.8	328.9	313.8	332.8	328.9	8.5	6.5	5.4
Fm-Kosten [€/fm]	6.79	6.79	6.79	4.44	4.44	4.44	2.34	2.34	2.34

In Tabelle 54 sind sämtliche Versuchsergebnisse im Überblick zu betrachten. Dabei empfiehlt sich nicht für alle Ergebnisse eine graphische Auswertung. Folgende Aussagen können daher bereits zu diesem Zeitpunkt getroffen werden:

- Durch den Einsatz des Schleppertarifs liegen die Werte der RAZ, die durch eine Erhöhung bzw. Verringerung des Zeitgrades auf 130 bzw. 70 verändert werden, exakt bei den voreingestellten Werten. Das bedeutet, dass bei einem Rückegassenabstand von 20 m die RAZ für das Vorrücken der im Bestand verstreuten Abschnitte und das Rücken aus dem Bestand bei einem Zeitgrad von 70 einen Wert annimmt, der genau 70 % des RAZ-Wertes bei einem Zeitgrad von 100 entspricht. Diese Übereinstimmung trat bei den mit Einzelzeiten arbeitenden Systemen Harvester und Forwarder aufgrund des sich stetig ändernden Verhältnisses von Fahrzeiten zur Summe der anderen, durch eine Zeitgradveränderung direkt betroffenen Zeiten der Arbeitsprozesse nicht auf.

  Der Schleppertarif berechnet die Dauer des Vorrückens und Rückens in Minuten pro Festmeter als Gesamtwert pro Abschnitt, d.h. die Fahrzeiten sind in diesem Wert mit einem festen Anteil von etwa 19 % (aus verschiedenen wissenschaftlichen Arbeiten hergeleitet, s. Kapitel 5.6.4) bereits enthalten. So wirkt sich eine Zeitgradveränderung beim Schlepper also auch indirekt auf die Fahrzeiten aus, was den realen Vorgängen zwar nicht entspricht, allerdings aufgrund der Tatsache, dass der Schleppertarif die zum Zeitpunkt der Modellerstellung umfangreichsten Daten für das System lieferte, als bestmögliche Variante zur Berechnung der zeitgradbeeinflussten Werte angesehen werden muss.
- Bemerkenswert ist außerdem, dass das System Schlepper – wiederum begründbar durch den Einsatz eines Tarifs und keiner Einzelzeiten – in Unabhängigkeit der verschiedenen Rückegassenabstände und damit verbunden in Unabhängigkeit der Anzahl der geernteten Holzmenge und der zu transportierenden Abschnitte stets die gleiche Produktivität (TAP) bzw. die gleichen Festmeter-Kosten berechnet. So wird beispielsweise das Vorrücken im Bestand verstreuter Abschnitte bei einem Zeitgrad 100 über alle Erschließungsszenarien hinweg mit einer TAP von 17,4 und daraus resultierend mit einem Kostensatz von 3,35 €/fm simuliert. Diese Beobachtung zeigt, dass den in Abbildung 127 dargestellten Produktivitätsformeln des Schleppertarifs eine „Grundproduktivität“ hinterliegt, die zwar durch Variation der Arbeitsstrategie und des Zeitgrades, aber nicht durch den Einfluss unterschiedlicher Erschließungssysteme verändert werden kann.

Die weiteren Auswertungen werden nun durch Graphiken unterstützt dargestellt.

7.4.1 Versuchsreihe 1: Auswirkungen von Veränderungen des Zeitgrades des Schleppers auf verschiedene Systemparameter bei gleichzeitiger Veränderung des Rückegassenabstandes

Auswirkungen auf die Reine Arbeitszeit (RAZ)	
Ausgangssituation System Schlepper	Mit Ausnahme des Parameters „Zeitgrad“ bleiben sämtliche Einstellungen bei allen Simulationsläufen unverändert.
Hypothese 1	Es wird erwartet, dass eine Veränderung des Zeitgrades des Schleppers (ausgehend von einem Zeitgrad 100) in diesem Fall dazu führt, dass 1. durch eine Erhöhung des Zeitgrades auf 130 die Reine Arbeitszeit [h] der Maschine abnimmt, und dass 2. durch eine Verminderung des Zeitgrades auf 70 die Reine Arbeitszeit [h] zunimmt.
Hypothese 2	Im Bezug auf die Erhöhung der Rückegassenabstände von 20 m auf 40 m wird erwartet, dass die Reine Arbeitszeit schrittweise zunimmt.

Auswertung

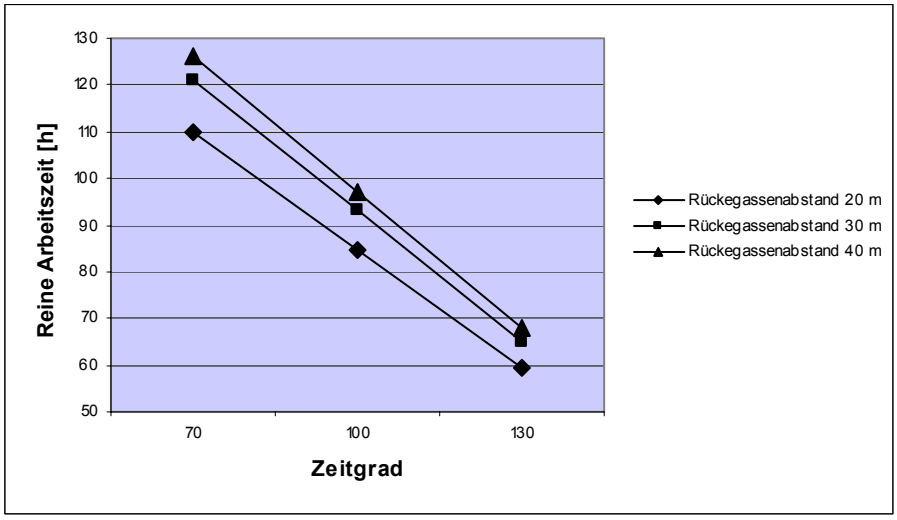


Abbildung 128: Auswirkung der Veränderung des Zeitgrades des Schleppers auf die Reine Arbeitszeit (RAZ) bei gleichzeitiger Erhöhung des Rückegassenabstandes von 20 m auf 40 m (Strategie: Vorrücken im Bestand verteilter Abschnitte und Rücken aus dem Bestand)

Das Ergebnis gleicht in seiner Aussage dem des Forwarders. Auch beim Schlepper führt die Anhebung des Zeitgrades von 70 auf 100 und 130 bei allen drei Abstandsvarianten zu einer entsprechenden Senkung der RAZ. Bei einem Gassenabstand von 40 m und der Strategie „Vorrücken im Bestand verteilter Abschnitte und Rücken aus dem Bestand“ kommt es dabei beispielsweise zu einer Reduktion von insgesamt 87,5 h (s. Abbildung 128).
Durch die größere Anzahl zu rückender Abschnitte steigt die RAZ ebenfalls mit zunehmendem Gassenabstand an. Damit kann auch Hypothese 2 bestätigt werden.

Auswirkungen auf die Technische Arbeitsproduktivität (TAP)	
Ausgangssituation System Schlepper	Mit Ausnahme des Parameters „Zeitgrad“ bleiben sämtliche Einstellungen bei allen Simulationsläufen unverändert.
Hypothese 1	Es wird erwartet, dass eine Veränderung des Zeitgrades des Schleppers (ausgehend von einem Zeitgrad 100) in diesem Fall dazu führt, dass 1. durch eine Erhöhung des Zeitgrades auf 130 die Technische Arbeitsproduktivität [fm/MAS] der Maschine zunimmt, und dass 2. durch eine Verminderung des Zeitgrades auf 70 die Technische Arbeitsproduktivität [fm/MAS] abnimmt.
Hypothese 2	Im Bezug auf die Erhöhung der Rückegassenabstände von 20 m auf 40 m wird erwartet, dass die TAP gleich bleibt.

Auswertung

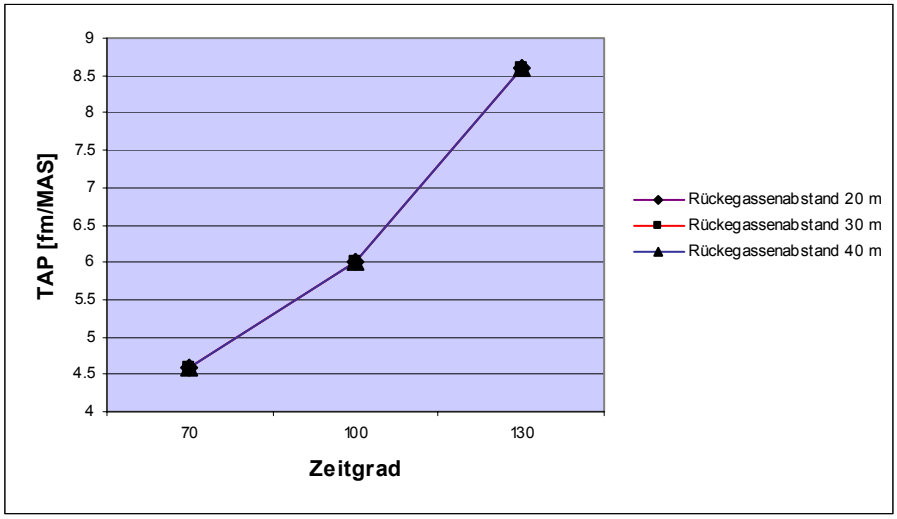


Abbildung 129: Auswirkung der Veränderung des Zeitgrades des Schleppers auf die Technische Arbeitsproduktivität (TAP) bei gleichzeitiger Erhöhung des Rückegassenabstandes von 20 m auf 40 m (Strategie: Vorrücken im Bestand verstreuter Abschnitte + Rücken aus dem Bestand)

Das Ergebnis zeigt, dass die Erhöhung des Zeitgrades einen Anstieg der TAP von 4,6 (Zeitgrad 70) auf 8,6 (Zeitgrad 130) zur Folge hat. Dieser Effekt (s. Abbildung 129) konnte auch schon beim System Forwarder beobachtet werden.

Interessant ist allerdings, dass sich die einzelnen TAP-Werte über die Versuchsreihen mit den unterschiedlichen Erschließungssystemen hinweg aufgrund der Berechnung der Arbeitszeiten mit dem Schleppertarif nicht verändern. Dabei fließt als einzige Größe die Stückmasse des jeweiligen Sortimentsabschnitts mit in die Berechnungen ein. Die entsprechende Vorrückdistanz wird nicht direkt berücksichtigt, sondern ist bereits in Form von Standardwerten in den Tarif integriert. Für das Vorrücken der Abschnitte mit Hilfe eines Seiles sind dabei Distanzen festgesetzt, die im Durchschnitt zwischen 0 und 20 Metern liegen, für das komplette Rücken wird von Wegstrecken zwischen durchschnittlich 0 bis 200 Metern ausgegangen (JACKE, 2003). Das bedeutet, dass dem aktuell im

Modell genutzten Tarif eine fest definierte „Grundproduktivität“ hinterliegt. Diese „Grundproduktivität“ der Maschine wird daher über die drei unterschiedlichen Erschließungsszenarien hinweg aufrechterhalten. Die Simulation erlaubt es in der jetzigen Form also noch nicht, Aussagen über ein Pro und Contra der unterschiedlichen Rückegassenabstände im Hinblick auf Produktivität (TAP) und Kosten (€/fm) dieses Arbeitssystems zu treffen. Es müsste zumindest die jeweilige Rückedistanz bekannt sein und in die entsprechende Formel mit einfließen oder es müsste – wie bei den Systemen Harvester und Forwarder - mit Einzelzeiten gerechnet werden.

Auswirkungen auf die Kosten pro Festmeter [€]	
Ausgangssituation System Schlepper	Mit Ausnahme des Parameters „Zeitgrad“ bleiben sämtliche Einstellungen bei allen Simulationsläufen unverändert.
Hypothese 1	Es wird erwartet, dass eine Veränderung des Zeitgrades des Schleppers (ausgehend von einem Zeitgrad 100) in diesem Fall dazu führt, dass 1. durch eine Erhöhung des Zeitgrades auf 130 die Kosten pro Festmeter [€] abnehmen, und dass 2. durch eine Verminderung des Zeitgrades auf 70 die Kosten pro Festmeter [€] zunehmen.
Hypothese 2	Im Bezug auf die Erhöhung der Rückegassenabstände von 20 m auf 40 m wird erwartet, dass die Kosten pro Festmeter [€] gleich bleiben.

Auswertung

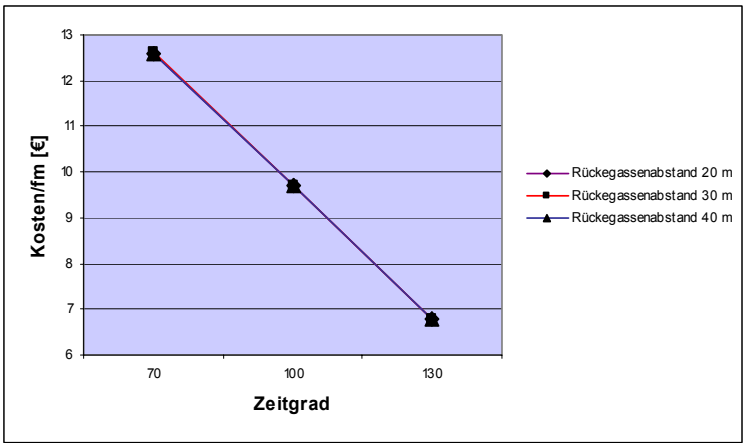


Abbildung 130: Auswirkung der Veränderung des Zeitgrades des Schleppers auf die Kosten pro Festmeter bei gleichzeitiger Erhöhung des Rückegassenabstandes von 20 m auf 40 m (Strategie: Vorrücken im Bestand verstreuter Abschnitte + Rücken aus dem Bestand)

Proportional zum beobachteten Verhalten der TAP sinken die Kosten pro Festmeter mit zunehmender Erhöhung des Zeitgrades ab (s. Abbildung 130). Ebenso bewirkt die Ausdehnung der Rückegassenabstände bedingt durch die dem Schleppertarif hinterliegende „Grundproduktivität“ keine Kostenreduzierung. Es lässt sich also nicht feststellen, welches Erschließungsszenario hinsichtlich TAP und Kosten am geeignetsten erscheint.

Kurzzusammenfassung der Ergebnisse von Versuchsreihe 1 (Schlepper):

Auch für das System Schlepper lässt sich eine **Reduktion der RAZ**, eine **Steigerung der TAP** und eine entsprechende **Absenkung der Stückkosten** während der **Simulation mit drei unterschiedlichen Zeitgrad-Werten (70, 100, 130)** feststellen. Der Einsatz des speziellen Schleppertarifes aus NRW bewirkt dabei allerdings, dass es **bei den Größen TAP und Kosten pro Festmeter über die drei verschiedenen Erschließungsszenarien** hinweg **keine Veränderungen** gibt.

7.4.2 Versuchsreihe 2: Auswirkungen von Veränderungen der Arbeitsstrategie des Schleppers auf verschiedene Systemparameter bei zum Teil gleichzeitiger Veränderung des Zeitgrades

Die vorangegangene Versuchsreihe hat gezeigt, dass der Einsatz des Schleppertarifs durch die allgemeingültige Berechnung eines GAZ-Wertes in Minuten pro Festmeter für die einzelnen Abschnitte eine Differenzierung der unterschiedlichen Erschließungsszenarien nicht erlaubt, d.h. die TAP-Werte sowie die Kosten pro Festmeter verändern sich nicht. Aufbauend auf dieser Erkenntnis wird in dieser Versuchsreihe geprüft, inwieweit sich bei allen drei Erschließungssystemen eine Änderung der Arbeitsstrategie (Vorrücken im Bestand verstreuter Abschnitte, Vorrücken im Bestand verstreuter Abschnitte und Rücken aus dem Bestand, Rücken von vorkonzentrierten Abschnitten) bei teilweise gleichzeitiger Zeitgraderhöhung von 70 auf 100 und 130 auf die TAP auswirkt.

Auswirkungen auf die Technische Arbeitsproduktivität (TAP)	
Ausgangssituation System Schlepper	Mit Ausnahme der Parameter „Arbeitsstrategie“ und „Zeitgrad“ bleiben sämtliche Einstellungen bei allen Simulationsläufen unverändert.
Hypothesen	Es wird erwartet, dass 1. durch eine Erhöhung des Zeitgrades von 70 auf 100 und 130 die TAP insgesamt zunimmt, dass 2. die Strategie „Vorrücken im Bestand verstreuter Abschnitte“ gegenüber der Strategie „Rückung an der Gasse vorkonzentrierter Abschnitte“ eine höhere TAP aufweist, und dass 3. die Strategie „Rückung an der Gasse vorkonzentrierter Abschnitte“ wiederum gegenüber der Strategie „Vorrücken im Bestand verstreuter Sortimente und Rücken aus dem Bestand“ ebenfalls eine höhere TAP besitzt.

Auswertung

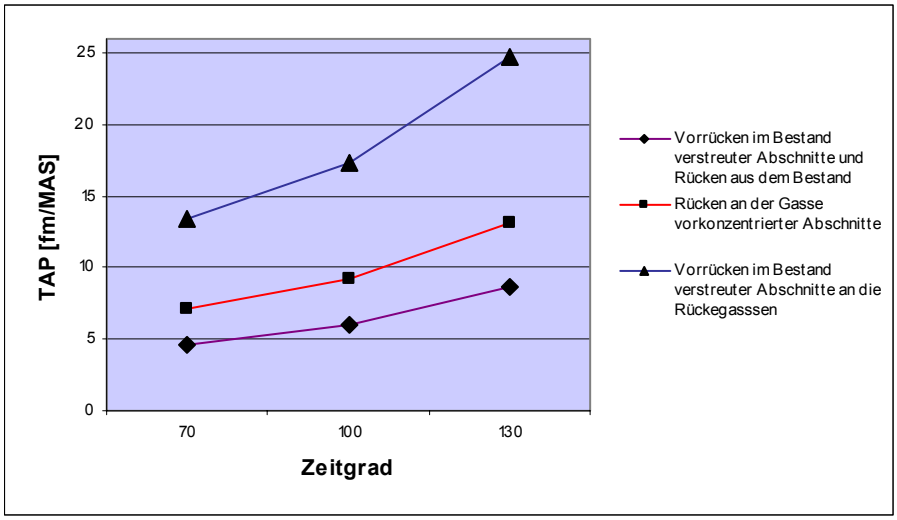


Abbildung 131: Auswirkung der Veränderung der Arbeitsstrategie auf die Technische Arbeitsproduktivität (TAP) bei gleichzeitiger Veränderung des Zeitgrades (70, 100, 130) bei durchschnittlichen Rückegassenabständen von 20, 30 und 40 m

Die in Abbildung 131 dargestellten Graphen gelten für alle drei Erschließungsszenarien (Gassenabstände 20 m, 30 m und 40 m). Wie bereits in Versuchsreihe 1 gezeigt, steigt mit zunehmendem Zeitgrad die TAP an, wobei diese Beobachtung für alle drei möglichen Arbeitsstrategien nachgewiesen wird.

Die Strategien selbst unterscheiden sich durch entsprechende Produktivitätsunterschiede. So ist das „Vorrücken im Bestand verstreuter Abschnitte“ die mit Abstand produktivste Strategie. Die Abschnitte müssen dabei lediglich mit dem Seil an den jeweiligen Gassen- bzw. Straßenrand gezogen werden.

Gefolgt wird diese Strategie vom „Rücken an der Gasse vorkonzentrierter Abschnitte“, da der Schlepper in diesem Fall nur mit der Rückezange arbeiten muss, ohne zusätzlich das Holz noch beizuseilen. Im Hinblick auf den allgemeinen Arbeitsablauf ist bei dieser Strategie der Fahraufwand deutlich größer als beim „Vorrücken im Bestand verstreuter Abschnitte“. Dieser Effekt wird in Abbildung 131 deutlich, auch wenn hier, wie bereits erwähnt, nur feste „Fahrzeitanteile“ und keine streckenbezogenen Fahrzeiten einfließen.

Als aufwendigste und damit mit der im direkten Vergleich geringsten TAP ausgestatteten Strategie ist die Kombination „Vorrücken im Bestand verstreuter Abschnitte und Rücken aus dem Bestand“ zu sehen. Die Maschine rückt das Holz zuerst mit Hilfe der Seilwinde vor und bringt es dann direkt zum Polter an die Forststraße. Der entsprechend hohe Zeitaufwand für diese Tätigkeiten bewirkt die relativ geringe Produktivität.

Auswirkungen auf das Verhältnis der tatsächlich durch den Schlepper transportierten zur tatsächlich geernteten Holzmenge	
Ausgangssituation System Schlepper	Mit Ausnahme der Parameter „Arbeitsstrategie“ und bleiben sämtliche Einstellungen bei allen Simulationsläufen unverändert.
Hypothesen	Es wird erwartet, dass 1. bei Auswahl der Strategien „Rückung an der Gasse vorkonzentrierter Abschnitte“ und „Vorrücken im Bestand verstreuter Sortimente und Rücken aus dem Bestand“ die gesamte, tatsächlich geerntete Holzmenge durch den Schlepper transportiert wird, und dass 2. bei Auswahl der Strategie „Vorrücken im Bestand verstreuter Abschnitte“ nicht die gesamte, tatsächlich geerntete Holzmenge durch den Schlepper transportiert wird.

Auswertung

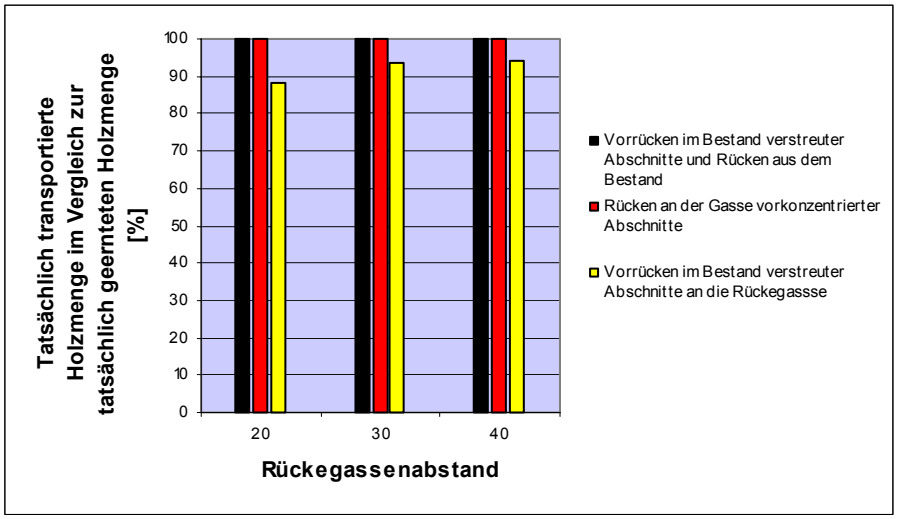


Abbildung 132: Auswirkung der Veränderung der Arbeitsstrategie auf die tatsächlich transportierte Holzmenge im Vergleich mit der tatsächlich geernteten Holzmenge bei gleichzeitiger Erhöhung des Rückegassenabstandes von 20 m auf 40 m

Hinsichtlich des Verhältnisses von tatsächlich geernteter zu tatsächlich transportierter Holzmenge ist bei den Ergebnissen der einzelnen Versuchsläufe in Abbildung 132 eine Abweichung zu erkennen. Während bei den beiden Arbeitsstrategien „Rückung an der Gasse vorkonzentrierter Abschnitte“ und „Vorrücken im Bestand verstreuter Sortimente und Rücken aus dem Bestand“ die gesamten, tatsächlich geernteten Holzmengen auch jeweils bis zu ihrem Endziel, den Poltern an der Forststraße, transportiert werden, geschieht dies nicht bei der Strategie „Vorrücken im Bestand verstreuter Abschnitte“, deren Ziel die Ablage der Abschnitte in fest definierter Distanz von 3 m zur Rückegassenmitte ist. So werden beispielsweise bei einem Gassenabstand von 20 m nur 88,3 % der geernteten Masse auch wirklich vorgerückt, d.h. 11.7 % werden nicht bewegt. Wie aber kommt es zu diesem Systemverhalten?

Der Grund, warum nicht alle Abschnitte transportiert werden, liegt an der Position ihrer Ablagepunkte. Wie in Kapitel 5.5 näher erläutert, haben die Forststraßen und Rückegassen im Modell eine Breite von 4,50 m. Dabei zählt die Mitte der Straße oder Gasse als Grenzlinie. Ein Baum, der sich also näher als 2,25 m zur Straßen- bzw. Gassenmitte befindet, wird – wie bereits erklärt - automatisch vor Beginn der Simulation „eliminiert“, findet also keine Berücksichtigung mehr im abgebildeten Bestand. Hinzu kommt, dass für die Ablage der einzelnen Sortimentsabschnitte nach der Vorrückung durch den Schlepper oder das Pferd entsprechende Ablagepunkte generiert werden, die in einer fest definierten Distanz von 3,0 m von der Gassenmitte entfernt liegen. Befindet sich nun also ein Baum in dem 0,75 m breiten Abschnitt zwischen Gassengrenze und Ablagepunkten, liegen seine Sortimente, die ja im Anschluss an die Ernte automatisch an seinem Stammfußpunkt platziert werden, so nah an der Straße oder Gasse, dass sie weder durch den Schlepper, noch durch das Pferd vorgerückt werden müssen (s. Abbildung 134, Seite 187). Es lässt sich also erklären, warum der Schlepper nicht alle im Bestand befindliche Abschnitte vorgerückt hat. In den verschiedenen Modellen setzt sich die Anzahl der vorhandenen, aber nicht vorzurückenden Abschnitte folgendermaßen zusammen (s. Tabelle 55).

Tabelle 55: Anzahl und Anteile der durch den Schlepper transportierten und nicht transportierten Holzmengen

	20 m RG-Abstand	30 m RG-Abstand	40 m RG-Abstand
Anzahl zu erntender Bäume im Bestand [Stk.]	1085	1190	1245
Anzahl im Bestand vorhandener Abschnitte GESAMT [Stk.]	5402	5940	6208
Anzahl tatsächlich vorgerückter Abschnitte [Stk.]	4784	5546	5862
Anzahl NICHT vorgerückter Abschnitte [Stk.]	618	394	346
Anzahl Bäume im Bereich von 2,25 m bis 3 m Entfernung zur Gassenmitte [Stk.]	124	80	70
Anzahl Abschnitte im Bereich von 2,25 m bis 3 m Entfernung zur Gassenmitte [Stk.]	618	394	346

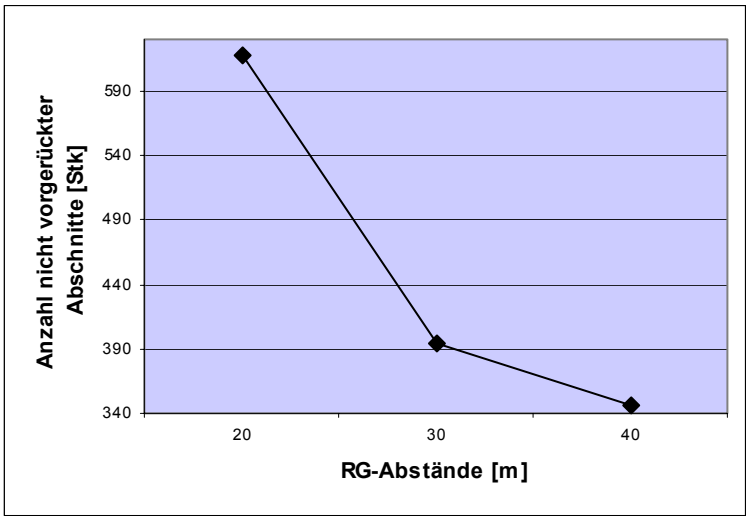


Abbildung 133: Auswirkung der Veränderung des Rückegassenabstandes von 20 m auf 40 m auf die Anzahl nicht durch den Schlepper vorgerückte Abschnitte aufgrund ihrer Positionierung zwischen 2,25 m und 3 m Abstand zur Gassenmitte

Ein Blick auf Tabelle 55 zeigt, dass mit zunehmendem Rückegassenabstand die Anzahl der nicht durch den Schlepper vorgerückten Abschnitte insgesamt abnimmt, während in Abbildung 133 deutlich

wird, dass bei einem zunehmend breiter werdenden Rückegassenabstand immer weniger Abschnitte im Bereich zwischen Rückegassengrenze und Ablagepunkten platziert sind.

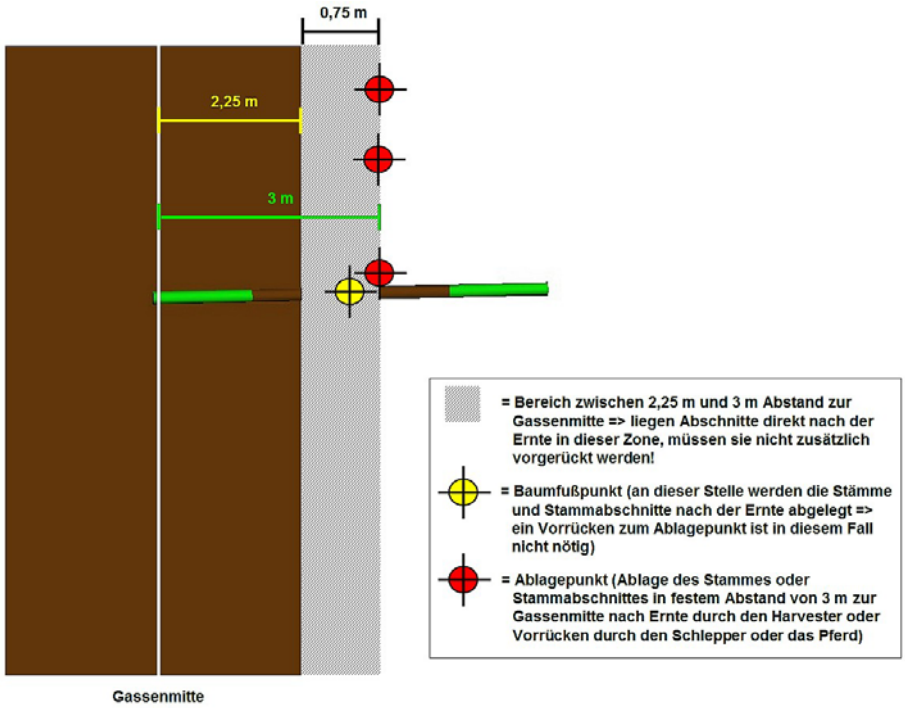


Abbildung 134: Darstellung der 0,75 m breiten Zone zwischen Gassengrenze und Ablagepunkten

Eine Zunahme des Gassenabstandes bringt einen zusätzlichen Gewinn an potenzieller Wuchsfläche mit sich, was sowohl die Anzahl an Bäumen insgesamt, sowie auch an Erntebäumen erhöht. Hinzu kommt, dass – im Verhältnis zu einem geringeren Gassenabstand betrachtet - durch die stetig kleiner werdende Zahl von Rückegassen auch immer weniger Erntebäume bzw. ihre Abschnitte in den 0,75 m breiten Zonen zwischen Gassengrenzen und Ablagepunkten positioniert sind. Der Schlepper muss also, im Verhältnis betrachtet, bei einem Gassenabstand von 40 m deutlich mehr Abschnitte vorrücken, als bei einer Distanz von 20 m.

Kurzzusammenfassung der Ergebnisse von Versuchsreihe 2 (Schlepper):

Unterschiedliche Arbeitsaufgaben des Schleppers konnten in der Simulation **mit unterschiedlich hoher Produktivität** ausgeführt werden. Die Strategie „Vorrücken im Bestand verstreuter Abschnitte an die Rückegassen“ erwies sich in allen drei Erschließungsszenarien als deutlich produktiver, als die Strategie „Rücken an den Gassen vorkonzentrierter Abschnitte“, die im Hinblick auf die Produktivität aber noch vor der Aufgabe „Vorrücken im Bestand verstreuter Abschnitte und Rücken aus dem Bestand“ lag.

Zudem wurde deutlich, dass **das Modell in der Lage ist**, bereits **Abschnitte, die nahe genug für eine Rückung an der Gasse liegen zu erkennen** und bei entsprechenden Vorrückaktionen - wie in der Realität - nicht unnötig zu bewegen.

7.5 Versuche mit dem Arbeitssystem Pferd

Für das Arbeitssystem Pferd sind bei der Auswertung der einzelnen Simulationsläufe folgende Einfluss- und Ergebnisgrößen sowie ihre Beziehungen zueinander von besonderer Bedeutung (s. Abbildung 135).

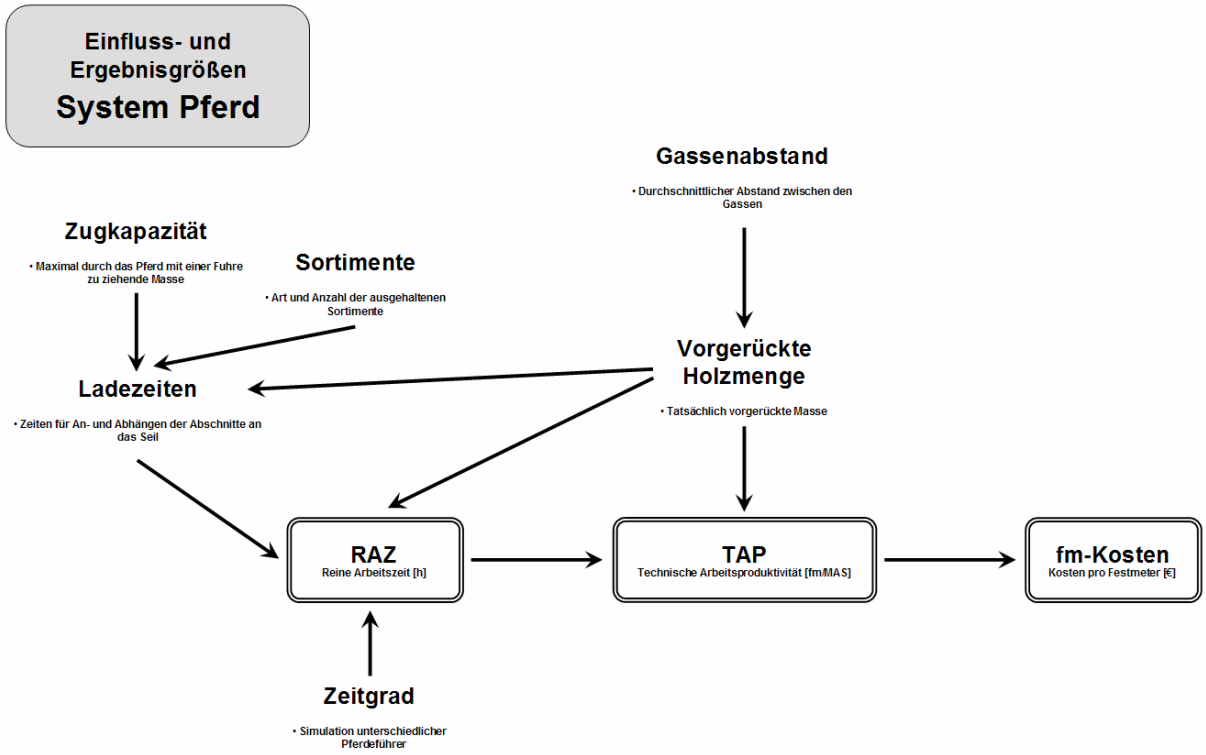


Abbildung 135: Einfluss- und Ergebnisgrößen für das System Pferd

Reine Arbeitszeit (RAZ), Technische Arbeitsproduktivität (TAP) und Kosten pro Festmeter sind auch in diesem Fall erneut die wichtigsten Einfluss- und Ergebnisgrößen, die man bei der Auswertung einer Simulation des Pferdes und der damit verbundenen Entscheidungsfindung für oder gegen das Arbeitssystem besonders beachten muss. Dabei ist anzumerken, dass das Pferd lediglich für den Arbeitsprozess des Vorrückens eingesetzt werden kann, also normalerweise im Anschluss an eine motormanuelle Holzernteaktion.

Wie schon bei den Systemen Motormanuelle Holzernte und Schlepper, kommt auch bei der Berechnung der Arbeitszeit des Pferdes ein speziell entwickelter Tarif zum Einsatz. Allerdings liefert dieser Tarif keine direkten Angaben über den Zeitverbrauch pro bearbeiteten Festmeter, sondern berechnet unter Berücksichtigung von Stückmasse und Vorrückentfernung einen Leistungswert in Festmeter pro Pferdearbeitsstunde (PAS). Tabelle 56 beinhaltet die entsprechende Formel. Durch Umrechnung der gewonnenen Werte kann aber auch problemlos die Dauer des Vorrückprozesses für jeden einzelnen Stammabschnitt in Minuten pro Festmeter bestimmt werden.

Tabelle 56: Formeln zur Berechnung der Vorrückprozesse des Rückepferdes

Produktivität [fm/PAS]	**Z * Stückmasse, mit Z = A + [B / (C + E)]**	**A = 1,24** **B = 1057** **C = 33,35** **E = Vorrückentfernung [m]**

Des Weiteren ist im Modell eine maximale Zugkapazität für das Pferd von 0,6 fm pro Fuhre definiert. Diese Limitierung ist nicht durch den Nutzer im Frontend änderbar, sondern hinterliegt der Simulation als fest eingestellter Wert. Das ist notwendig, da der Zeitverbrauch für das Vorrücken der einzelnen Abschnitte mit Hilfe des oben genannten Tarifes berechnet wird. Daher ist der Einfluss einer veränderten Zugkapazität zeitlich nicht darstellbar, da für das Pferd keine Einzelzeiten für unterteilte Arbeitsprozesse berechnet werden können. Die Limitierung der maximalen Zugkraft wird allerdings zur realistischen Abbildung der Vorrück-Prozesse benötigt, da in der graphischen Darstellung des Pferdes ansonsten alle Abschnitte auf einmal angehängt werden würden.
Die durchgeführten Versuche beziehen sich aufgrund der durch Einsatz des Tarifs „relativ starren“ Simulationsbedingungen nur auf die veränderbare Größe „Zeitgrad“. Dabei wurden folgende Ergebnisse ermittelt (s. Tabelle 57).

Tabelle 57: Simulationsergebnisse der Versuche mit dem System Pferd

	20 m RG-Abstand	30 m RG-Abstand	40 m RG-Abstand
Anzahl zu transportierender Abschnitte [Stk]	**5402**	**5940**	**6208**
Vorgerückte Abschnitte [Stk] **(Zeitgrad 70)**	4782	5543	5860
Vorgerückte Abschnitte [%] **(Zeitgrad 70)**	88.5	93.3	94.4
Vorgerückte Holzmenge [fm]	448.4	520	549.5
MAS [h]	178.9	218.8	242.4
Anteil an den MAS mit Zeitgrad 100 [%]	130.0	130.0	130.0
TAP [fm/MAS]	2.5	2.4	2.3
Fm-Kosten [€/fm]	22.52	23.75	24.9
Vorgerückte Abschnitte [Stk] **(Zeitgrad 100)**	4782	5543	5860
Vorgerückte Abschnitte [%] **(Zeitgrad 100)**	88.5	93.3	94.4
Vorgerückte Holzmenge [fm]	448.4	520	549.5
MAS [h]	137.6	168.3	186.5
TAP [fm/MAS]	3.3	3.1	3
Fm-Kosten [€/fm]	17.32	18.27	19.15
Vorgerückte Abschnitte [Stk] **(Zeitgrad 130)**	4782	5543	5860
Vorgerückte Abschnitte [%] **(Zeitgrad 130)**	88.5	93.3	94.4
Vorgerückte Holzmenge [fm]	448.4	520	549.5
MAS [h]	96.3	117.8	130.5
Anteil an den MAS mit Zeitgrad 100 [%]	70.0	70.0	70.0
TAP [fm/MAS]	4.7	4.4	4.2
Fm-Kosten [€/fm]	12.12	12.79	13.41

Tabelle 57 zeigt sämtliche Versuchsergebnisse im Überblick. Dabei fällt auf, dass das Pferd in allen drei Versuchsbeständen mit unterschiedlichen Erschließungssystemen nicht in der Lage war, sämtliche Abschnitte vorzurücken. Dies hat zwei Gründe: Zum einen liegt es an der oben bereits erwähnten Limitation der Zugfähigkeit des Tieres auf maximal 0,6 fm. Diejenigen Abschnitte, die dieses Volumen übersteigen, werden vom Pferd nicht vorgerückt, obwohl man mit Hilfe der Tarifformel aus Tabelle 56 auch für sie eine Bearbeitungszeit berechnen könnte. Da die Literatur aber den Wert von 0,6 fm als Obergrenze der Leistungsfähigkeit bei Zugpferden nennt (SCHULZ, 1987), muss die Simulation im Hinblick auf eine Darstellung der realen Bedingungen mit diesem Wert arbeiten. Alle Abschnitte, die im Bestand zurückbleiben, könnten dann im Anschluss durch einen Schlepper gerückt werden. Die Möglichkeit, eine Liste mit den im Bestand verbliebenen Stammteilen zu erstellen, die als Grundlage für diesen Schleppereinsatz dienen kann, besteht. Diese Liste müsste aber zur Zeit noch von Hand erstellt und relativ aufwendig in das Modell reimplementiert werden. Im Zuge einer Weiterentwicklung des Modells besteht an dieser Stelle noch Entwicklungspotenzial.
Der zweite Grund, warum nicht alle Abschnitte vorgerückt werden, wurde bereits im Zusammenhang mit der Ergebnisauswertung der Versuche zum Arbeitssystem Schlepper besprochen. Auch bei der Simulation des Pferdes befinden sich zahlreiche Bäume bzw. ihre Abschnitte in dem 0,75 m breiten Abschnitt zwischen Gassengrenze und Ablagepunkten und dadurch so nah an der Straße oder Gasse, dass sie nicht durch das Pferd vorgerückt werden müssen. In den einzelnen Modellen setzt sich die Anzahl der vorhandenen, aber nicht vorzurückenden Abschnitte folgendermaßen zusammen (s. Tabelle 58).

Tabelle 58: Anzahl und Anteile der durch das Pferd transportierten und nicht transportierten Holzmengen

	20 m RG-Abstand	30 m RG-Abstand	40 m RG-Abstand
Anzahl zu erntender Bäume im Bestand [Stk.]	1085	1190	1245
Anzahl im Bestand vorhandener Abschnitte GESAMT [Stk.]	5402	5940	6208
Anzahl tatsächlich vorgerückter Abschnitte [Stk.]	4782	5543	5860
Anzahl Erntebäume, aus denen mindestens ein Abschnitt entsteht, der mehr als 0,6 fm Volumen besitzt [Stk.]	2	3	2
Anzahl Abschnitte mit einer Masse > 0,6 fm [Stk.]	2	3	2
Anzahl Bäume im Bereich von 2,25 m bis 3 m Entfernung zur Gassenmitte [Stk.]	124	80	70
Anzahl Abschnitte im Bereich von 2,25 m bis 3 m Entfernung zur Gassenmitte [Stk.]	618	394	346

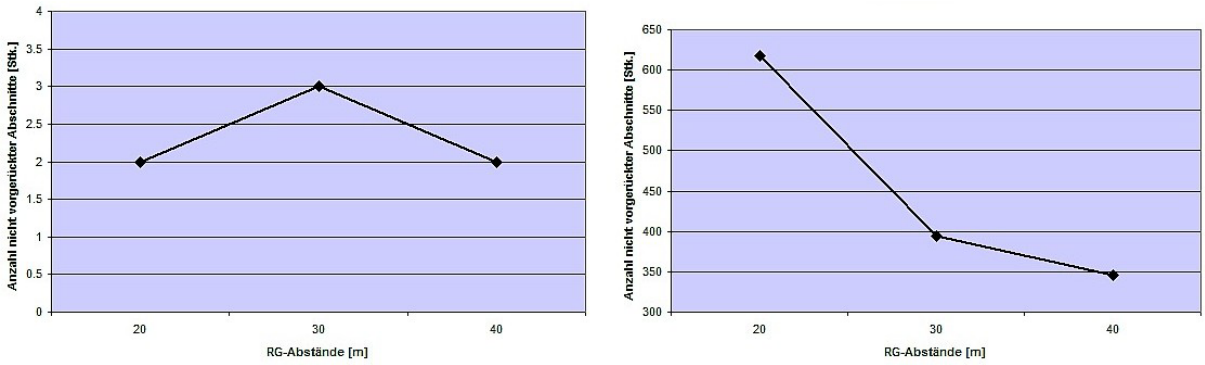


Abbildung 136: Auswirkung der Veränderung des Rückegassenabstandes von 20 m auf 40 m auf die Anzahl nicht durch das Pferd vorgerückter Abschnitte aufgrund zu hoher Einzelstückmasse (> 0,6 fm) (links) und Auswirkung der Veränderung des Rückegassenabstandes von 20 m auf 40 m auf die Anzahl nicht durch das Pferd vorgerückter Abschnitte aufgrund der Positionierung zwischen 2,25 m und 3 m Abstand zur Gassenmitte (rechts)

Eine Zunahme des Gassenabstandes bringt auch in diesem Fall einen zusätzlichen Gewinn an potenzieller Wuchsfläche mit sich, was sowohl die Anzahl an Bäumen insgesamt, sowie auch an Erntebäumen erhöht. Dass dabei auch weitere Bäume auf der Fläche platziert werden können, aus denen dann Abschnitte mit einer Masse > 0,6 fm gewonnen werden, ist normal, kommt aber nicht unbedingt immer vor, wie bei einem Gassenabstand von 40 m auf der linken Seite von Abbildung 136 zu sehen ist. Hinzu kommt, dass durch die immer geringer werdende Zahl von Rückegassen auch immer weniger Erntebäume bzw. ihre Stammabschnitte in den Zonen zwischen Gassen und Ablagepunkten positioniert sind. Das Pferd muss also – wie zuvor auch schon der Schlepper - bei einem Gassenabstand von 40 m deutlich mehr Abschnitte vorrücken als bei einer Distanz von 20 m.

7.5.1 Versuchsreihe: Auswirkungen von Veränderungen des Zeitgrades des Pferdes auf verschiedene Systemparameter bei gleichzeitiger Veränderung des Rückegassenabstandes

Auswirkungen auf die Reine Arbeitszeit (RAZ)	
Ausgangssituation System Pferd	Mit Ausnahme des Parameters „Zeitgrad“ bleiben sämtliche Einstellungen bei allen Simulationsläufen unverändert.
Hypothese 1	Es wird erwartet, dass eine Veränderung des Zeitgrades des Pferdes (ausgehend von einem Zeitgrad 100) in diesem Fall dazu führt, dass 1. durch eine Erhöhung des Zeitgrades auf 130 die Reine Arbeitszeit [h] des Pferdes abnimmt, und dass 2. durch eine Verminderung des Zeitgrades auf 70 die Reine Arbeitszeit [h] zunimmt.
Hypothese 2	Im Bezug auf die Erhöhung der Rückegassenabstände von 20 m auf 40 m wird erwartet, dass die Reine Arbeitszeit schrittweise zunimmt.

Auswertung

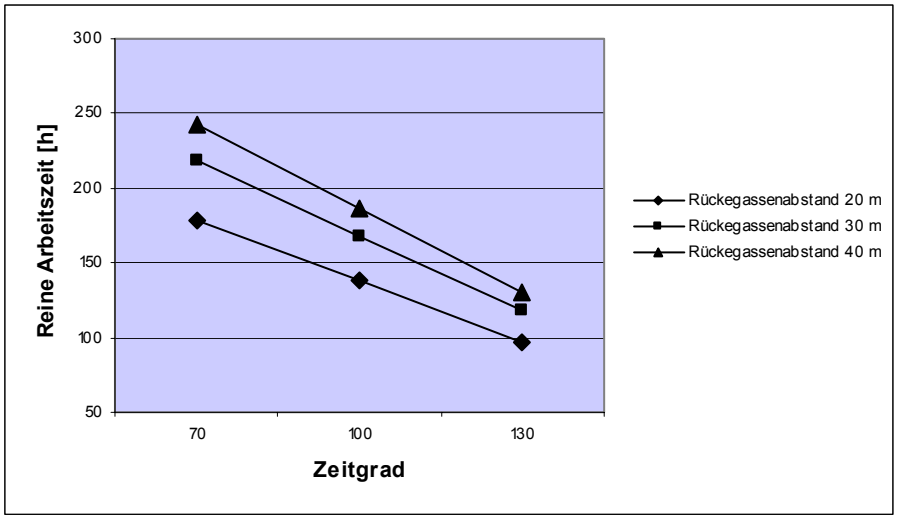


Abbildung 137: Auswirkung der Veränderung des Zeitgrades des Pferdes auf die Reine Arbeitszeit (RAZ) bei gleichzeitiger Erhöhung des Rückegassenabstandes von 20 m auf 40 m

Wie schon bei den Systemen Forwarder und Schlepper führt die Anhebung des Zeitgrades von 70 auf 100 und 130 bei allen drei Beständen zu einer entsprechenden Reduktion der RAZ. Bei einem Gassenabstand von 30 m ist eine Abnahme von 101 h zwischen Zeitgrad 70 und 130 zu beobachten (s. Abbildung 137).

Ebenso nimmt die RAZ in Abhängigkeit zur größeren Anzahl zu rückender Abschnitte mit zunehmendem Gassenabstand zu. Insgesamt liegt der Unterschied bei einem Gassenabstand von 40 m im Vergleich zur 20 m-Variante und einem Zeitgrad von 100 bei 101,1 h. Somit wird auch Hypothese 2 bestätigt.

Auswirkungen auf die Technische Arbeitsproduktivität (TAP)	
Ausgangssituation System Pferd	Mit Ausnahme des Parameters „Zeitgrad“ bleiben sämtliche Einstellungen bei allen Simulationsläufen unverändert.
Hypothese 1	Es wird erwartet, dass eine Veränderung des Zeitgrades des Pferdes (ausgehend von einem Zeitgrad 100) in diesem Fall dazu führt, dass 1. durch eine Erhöhung des Zeitgrades auf 130 die Technische Arbeitsproduktivität [fm/PAS] des Pferdes zunimmt, und dass 2. durch eine Verminderung des Zeitgrades auf 70 die Technische Arbeitsproduktivität [fm/PAS] abnimmt.
Hypothese 2	Im Bezug auf die Erhöhung der Rückegassenabstände von 20 m auf 40 m ist das Ergebnis im Hinblick auf die Tatsache, dass mit einem Tarif gerechnet wird, nicht genau absehbar.

Auswertung

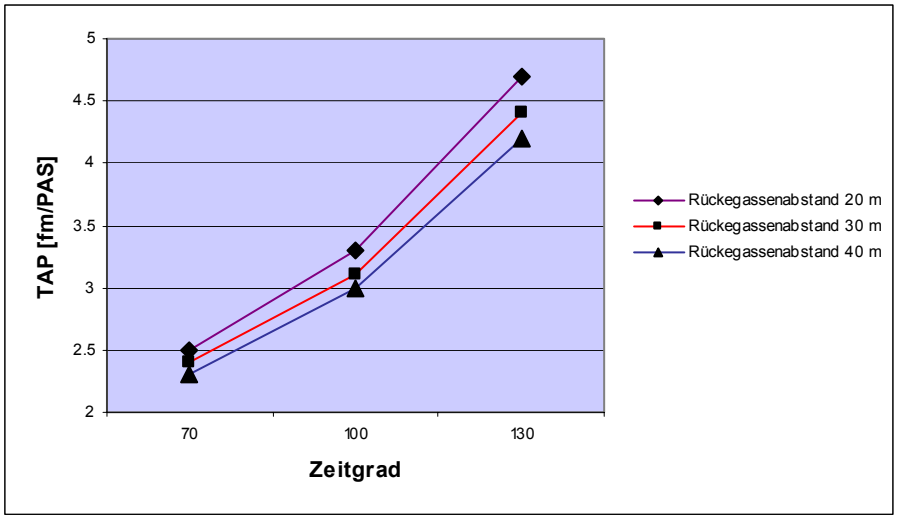


Abbildung 138: Auswirkung der Veränderung des Zeitgrades des Pferdes auf die Technische Arbeitsproduktivität (TAP) bei gleichzeitiger Erhöhung des Rückegassenabstandes von 20 m auf 40 m

Auch beim System Pferd führt die Erhöhung des Zeitgrades zu einem Anstieg der TAP, z.B. bei einem Gassenabstand von 20 m von 2,5 (Zeitgrad 70) auf 4,7 (Zeitgrad 130). Die Zunahme der Gassenabstände bewirkt allerdings, dass die TAP abnimmt (s. Abbildung 138).

Obwohl auch bei dieser Systemsimulation wie schon beim Schlepper mit einem speziellen Tarif gerechnet wird, unterscheiden sich die Ergebnisse bei der Kalkulation des Zeitaufwandes der Vorrückprozesse. Konnte beim Schlepper der Einfluss unterschiedlich weit auseinander liegender Rückegassen nicht nachgewiesen werden, zeigen sich die Auswirkungen beim Pferd sehr deutlich. Entscheidend ist der Vergleich der zwei eingesetzten Tarife bzw. der entsprechenden Formeln:

Die Produktivität des Schleppers wird in Minuten pro Festmeter berechnet, wobei die einzige Eingangsgröße das jeweilige Stückvolumen des vorzurückenden bzw. zu rückenden Stammabschnitts darstellt. Bei dieser Prämisse ist es leicht ersichtlich, dass die Auswirkungen einer Abstandsveränderung zwischen den Rückegassen auf die TAP nicht darstellbar sind.

Der Tarif, mit dessen Hilfe der Zeitverbrauch des Pferdes berechnet wird, liefert zwar Ergebnisse, die in Festmeter pro Pferdearbeitsstunde angegeben werden, arbeitet aber sowohl mit der individuellen Stückmasse, als auch mit der tatsächlichen Vorrückentfernung als Eingangsgrößen. Daher lassen sich die veränderten Arbeitsbedingungen beim Vorrücken jedes einzelnen Stammabschnitts im Modell rechnerisch abbilden. Das in Abbildung 138 dargestellte Ergebnis ist also Ausdruck dieses Rechenweges, denn mit zunehmendem Gassenabstand werden die Vorrückentfernungen der einzelnen Abschnitte zu den Gassen hin immer größer. Durch die immer länger werdenden Laufwege des Pferdes steigt automatisch der Zeitverbrauch pro Abschnitt, was durch die abnehmende TAP deutlich wird.

Auswirkungen auf die Kosten pro Festmeter [€]	
Ausgangssituation System Pferd	Mit Ausnahme des Parameters „Zeitgrad“ bleiben sämtliche Einstellungen bei allen Simulationsläufen unverändert.
Hypothese 1	Es wird erwartet, dass eine Veränderung des Zeitgrades des Pferdes (ausgehend von einem Zeitgrad 100) in diesem Fall dazu führt, dass 1. durch eine Erhöhung des Zeitgrades auf 130 die Kosten pro Festmeter [€] abnehmen, und dass 2. durch eine Verminderung des Zeitgrades auf 70 die Kosten pro Festmeter [€] zunehmen.
Hypothese 2	Im Bezug auf die Erhöhung der Rückegassenabstände von 20 m auf 40 m wird erwartet, dass die Kosten pro Festmeter [€] zunehmen.

Auswertung

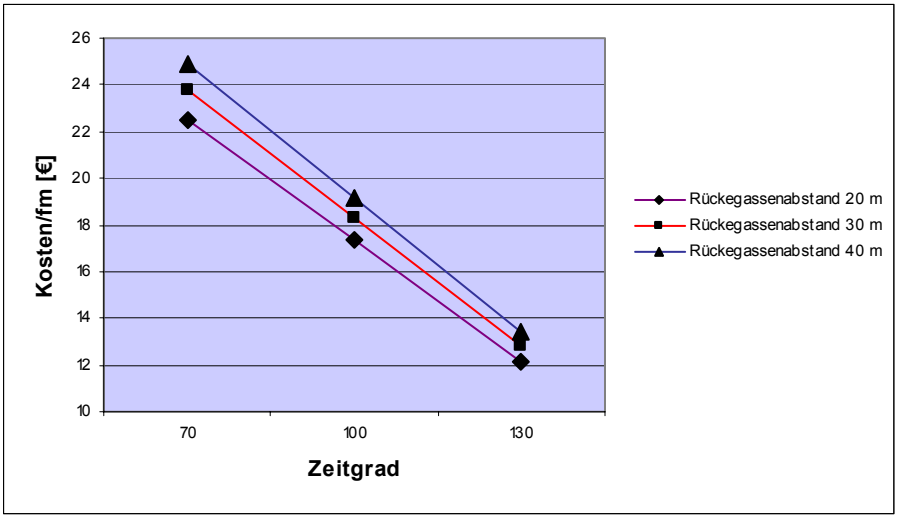


Abbildung 139: Auswirkung der Veränderung des Zeitgrades des Pferdes auf die Kosten pro Festmeter bei gleichzeitiger Erhöhung des Rückegassenabstandes von 20 m auf 40 m

Die zuvor analysierten Ergebnisse zur TAP schlagen sich in den Kosten pro Festmeter nieder. Die mit zunehmendem Rückegassenabstand abnehmende TAP verursacht einen Kostenanstieg (s. Abbildung 139). Zusammenfassend betrachtet ist ein hoher Erschließungsgrad einem günstigen Kostensatz pro Festmeter zuträglich, da die beim Vorrücken zu überwindenden Distanzen relativ kurz sind. Je weiter die Gassen aber auseinander liegen, desto teurer wird die Arbeit mit dem Rückepferd.

Kurzzusammenfassung der Ergebnisse von Versuchsreihe 1 (Pferd):

Die Ergebnisse der Simulation des Pferdes bei **Erhöhung des Zeitgrades** von 70 auf 100 und 130 gleichen denen der anderen vier Systeme. Die **RAZ nimmt ab**, **die TAP steigt** entsprechend an und die **Stückkosten sinken**. Die **Auswirkungen der drei unterschiedlichen Erschließungsnetze** auf anfallende Holzmengen und Dauer der Arbeiten sind ebenfalls **nachweisbar**.

7.6 Zusammenfassung der Versuchsergebnisse aller fünf untersuchten Arbeitssysteme

Harvester

Ein **deutlicher Vorteil** des Systems Harvester ist der **Einsatz spezieller Produktivitätsformeln** für die Teilarbeitsprozesse „Positionieren des Aggregats“, „Fällschnitt“, „Fällen und Vorliefern“, „Vorschub“ und „Trennschnitt“ sowie die **individuelle Berechnung von Fahrzeiten** durch Definition einzelner Fahrgeschwindigkeiten. Auf diese Weise lassen sich **äußerst präzise Kennzahlen** berechnen, da tatsächlich jeder neu positionierte Erntebaum, jeder hinzugekommene Abschnitt und jede in ihrem Verlauf abgeänderte Rückegasse oder Forststraße direkte Auswirkungen auf den Arbeitsprozess der Maschine haben.
Die durchgeführten Versuche zu den Systemparametern „Kranreichweite“, „Zeitgrad“ und „Anteil der MAS an der GAZ“ liefern durchweg sehr gute Ergebnisse. Oberflächlich betrachtete „Ungenauigkeiten“ wie beispielsweise die Größe „Zurückgelegte Wegstrecke“, die sich trotz der deutlichen Variation der Kranreichweite und der gleichzeitigen Veränderung der Rückegassenabstände nur um 200 m reduziert, lassen sich durch das mit 11 Hektar recht „kleine“ Modell erklären. Die Bearbeitung dieser Fläche wird in relativ kurzer Zeit durchgeführt und erlaubt dadurch nur eine in manchen Bereichen eingeschränkte Darstellung der Modellfähigkeiten. Dieses Phänomen tritt auch noch einmal bei den beobachteten Werten der GAZ auf, die durch Veränderung der MAS-Anteile beeinflusst werden. Eine Erhöhung der Erntebaumanzahl würde gleichzeitig die GAZ verlängern und damit eine noch deutlichere Funktionalität des Störungsmoduls bewirken. Dieser Effekt konnte aber in gesonderten Versuchen durch die Hinzunahme weiterer Erntebäume nachgewiesen werden.
Die übrigen Versuchsergebnisse zeigen, dass die Simulation des Systems Harvester **äußerst detaillierte Werte** liefert. Zu nennen sei hier nur der Nachweis für die von der Veränderung des Zeitgrades beeinflussten Zeitanteile für das Fällen und Aufarbeiten, betrachtet im Verhältnis zu den Fahrzeiten, die eine bisher **nicht erreichte Präzision im Bereich der Simulation forsttechnischer Arbeitseinsätze** besitzen.

Motormanuelle Holzernte

Sind es beim Harvester noch Einzelzeiten, die mit großer Präzision ermittelt werden können, basiert die Simulation der Motormanuellen Holzernte nicht mehr auf dem Einsatz spezieller Produktivitätsformeln für bestimmte Teilarbeitsprozesse, sondern auf einem **Tarifwerk**, dem so genannten EST. Der **entscheidende Unterschied** zur Berechnung der Dauer und der Leistungswerte liegt in der Tatsache, dass nun zwar auch für jeden einzelnen, durch einen Waldarbeiter produzierten Stammabschnitt eine individuelle Zeit aus der zuvor entsprechend festgelegten Tabelle des Tarifs ermittelt wird, dabei aber andere **Einflussfaktoren** wie die Länge der Laufwege, die Häufigkeit und Dauer von Unterbrechungen oder zusätzliche Erschwernisse bei der Arbeit entweder **gar nicht** oder nur **in Form von Mittelwerten oder Zuschlägen in das Endergebnis mit einfließen**. Dies bedeutet

allerdings nicht, dass die auf diese Weise errechneten Werte von schlechter Qualität sind. Die **Simulation** ist durch den Einsatz des Tarifes in ihrer Arbeitsweise lediglich **nicht so hochauflösend** wie beim System Harvester.
Die Variation der Arbeiteranzahl und des Zeitgrades haben sehr gute Ergebnisse geliefert. Es lassen sich problemlos die Effekte einer zahlenmäßig vergrößerten Waldarbeiterrotte gegenüber der Aufarbeitung durch nur einen einzelnen Arbeiter darstellen, und auch die Auswirkungen unterschiedlicher Leistungsfähigkeit können nachgewiesen werden. Damit kann eine **ohne Einschränkung funktionstaugliche Simulation** dieses Arbeitssystems bestätigt werden.

Forwarder

Wie schon beim Harvester ermöglicht auch hier der Einsatz von Produktivitätsformeln zur **Einzelzeitberechnung** für die Prozesse „Beladen“, „Entladen“ und „Zusätzliches Kranen“ **Ergebnisse von sehr guter Qualität**. Veränderungen von Ladekapazität, Zeitgrad und MAS-Anteil an der GAZ belegen einen **reibungslosen Ablauf der Simulationsprozesse**. Besonders die Anteile von Kranarbeits- und Fahrzeiten hinsichtlich der modifizierten Zeitgrad-Werte werden deutlich sichtbar.
Der Forwarder kann als Einzelmaschine oder in Kombination mit dem Harvester oder der Motormanuellen Holzernte als **voll funktionsfähiges Simulationssystem** eingesetzt werden.

Schlepper

Das System Schlepper ist ähnlich wie das System Motormanuelle Holzernte durch den Einsatz des **Schleppertarifs** in seiner **Funktionalität** im Vergleich zu den Arbeitssystemen Harvester und Forwarder **eingeschränkt**. Es erlaubt ohne Probleme **Aussagen zu Dauer, Produktivität und Kosten für bestimmte Arbeitseinsätze**, bietet aber **keinen Spielraum für eine differenzierte Aufschlüsselung der berechneten Werte**. So sind beispielsweise **keine direkten Produktivitäts- und Kostenvorteile bzw. -nachteile verschiedener Erschließungssysteme berechenbar**, da der besonders wichtige Prozess des Fahrens auf Gassen und Forststraßen nur als geschätzter Prozentanteil der RAZ-Werte des Tarifs in das Endergebnis mit einfließt. Die Möglichkeit, solche Einzelzeiten getrennt und in Abhängigkeit verschiedener Erschließungssysteme herzuleiten, bietet einzig das Aufteilen des Gesamtarbeitsprozesses in kleinere Teilprozesse und die Verknüpfung dieser mit entsprechenden Produktivitätsformeln. Die aktuelle Verfügbarkeit an Daten zu diesem Arbeitssystem erlaubt eine solche Vorgehensweise jedoch noch nicht. Der Tarif stellt **augenblicklich die bestmögliche Alternative zur Kalkulation der benötigten Kennzahlen** dar und **funktioniert** in der Simulationsanwendung **ohne Einschränkungen**. Sollte sich aber im Laufe der Zeit eine bessere Datenbasis finden, wäre es kein Problem, das System dahingehend zu verändern.

Pferd

Bei Betrachtung des Ablaufs eines Arbeitszyklus des Rückepferdes wird deutlich, dass dieses System im Hinblick auf die Komplexität der Arbeitsaufgabe mit Abstand den einfachsten Teil der Simulation darstellt. Das Pferd bewegt sich im Bestand und transportiert die zuvor produzierten Abschnitte lediglich an die Rückegassen, von wo aus sie dann durch andere Arbeitssysteme gerückt werden können.
Auch wenn für das Pferd während der Simulation mit einem **Tarif-System** kalkuliert wird, **besitzt** dieses eher den **Charakter einer Produktivitätsformel** nach Art der Systeme Harvester und Forwarder. Neben den in dieser Formel angewendeten Konstanten fließt auch die **Vorrückentfernung** und die **Stückmasse für jeden vorzurückenden Stammabschnitt** in die Berechnung der Bearbeitungszeit mit ein. Da, wie bereits erwähnt, der Arbeitsprozess des Pferdes relativ simpel gehalten ist, sind diese Variablen ausreichend, um **sehr präzise Ergebnisse** liefern zu können.
Auch die **Anzahl der „Stellschrauben“**, also der variablen Eingangsparameter, die durch den Nutzer frei veränderbar sind, ist aufgrund der überschaubaren Tätigkeiten **begrenzt**. Die durchgeführten Versuche mit dem Parameter Zeitgrad zeigen aber, dass sich dessen Einfluss auf die Simulation problemlos nachweisen lässt und somit eine **realitätsnahe Darstellung des Arbeitssystems Pferd** im Modell möglich ist.

Erschließungssysteme

Die zahlreich durchgeführten Versuche zu den einzelnen Arbeitssystemen wurden in allen Fällen parallel mit einer Erhöhung der Rückegassenabstände durchgeführt. Dabei vergrößerte sich der Abstand der drei idealisierten Gassensysteme von 20 m auf 30 m und 40 m, wobei gleichzeitig der Anteil an „Wuchsfläche“ zunahm und damit auch realistische Veränderungen beim aufstockenden Bestand auftraten. So erhöhte sich die Anzahl der Erntebäume bei Reduktion der Rückegassen, blieb dabei aber immer im Rahmen des vorgesehenen Entnahmesatzes (ca. 15 %).
Mit Ausnahme der Systeme Schlepper und Motormanuelle Holzernte, deren Tarife die Auswirkungen der zurückzulegenden Fahrstrecken bzw. Fußwege nicht berücksichtigen, konnte bei allen anderen Arbeitsystemen eine **Veränderung der untersuchten Leistungskennzahlen als Reaktion auf das modifizierte Erschließungssystem** beobachtet werden.
Dem Nutzer wird somit die Möglichkeit eingeräumt, neben den frei einstellbaren Systemparametern und den Eigenschaften des aufstockenden Bestandes **auch die erschließungstechnischen Gegebenheiten zu variieren** und auf diese Weise das für ihn unter wirtschaftlichen, aber auch ökologischen Gesichtspunkten **bestmögliche Szenario hinsichtlich der Straßen- und Gassenführung** zu ermitteln.

7.7 Das Original-Erschließungssystem als Referenz

In Kapitel 7.6 sind die Kernaussagen zu den einzelnen Arbeitssystemen zusammengefasst. Hinsichtlich einer bestimmten, für diesen Bestand am besten geeigneten Holzerntesystem-Kombination und den unterschiedlichen Erschließungsnetzen mit festgelegten Rückegassenabständen von 20 m, 30 m und 40 m kann zu diesem Zeitpunkt aber noch keine Empfehlung gegeben werden. Zuvor ist es notwendig, dieselben Versuche mit denselben Arbeitssystemen unter Berücksichtigung der fest definierten Systemparameter in einem Modell des tatsächlich existierenden Bestandes durchzuführen. Auf diese Weise ist ein direkter Vergleich derselben Systemkombinationen in unterschiedlichen Erschließungsszenarien möglich. Die Ergebnisse können dem potenziellen Nutzer dann im Anschluss als Entscheidungsunterstützung dienen.

Es zeigt sich, dass die drei neu entwickelten Erschließungsmodelle bei den entscheidenden Bestandeskennzahlen kaum vom „Original-Bestand“ abweichen (s. Tabelle 59). Die zum Teil sehr deutlichen Abänderungen bei der Erschließungsdichte und dem Gassenverlauf haben demnach keine direkten Auswirkungen auf die Bestandeseigenschaften. Sowohl die Stammzahlen des aufstockenden und des zu erntenden Bestandes, als auch deren durchschnittliche Werte von BHD und Höhe bleiben nahezu unverändert. Ein System-Vergleich ist unter diesen fast identischen Voraussetzungen also ohne Einschränkungen möglich.

Tabelle 59: Bestandeskennzahlen der vier unterschiedlichen Modelle

	20 m RG-Abstand	30 m RG-Abstand	40 m RG-Abstand	Original Erschließungssystem
Anzahl Bäume im Modell [Stk.]	9698	9690	9686	9686
Davon Bäume auf Rückegassen und Forststraßen (werden automatisch eliminiert)	2501	1767	1454	1896
Anzahl Bäume aufstockender Bestand [Stk.]	7331	8065	8378	7817
Anzahl Erntebäume des aufstockenden Bestandes [Stk.]	1085	1190	1245	1169
Anteil Erntebäume an aufstockendem Bestand [%]	14.8	14.8	14.9	15.0
Durchschnittlicher BHD aufstockender Bestand [cm]	23.8	23.8	23.8	23.8
Durchschnittliche Höhe aufstockender Bestand [m]	19.2	19.2	19.2	19.2
Durchschnittlicher BHD Erntebäume [cm]	25.8	25.8	25.8	26.0
Durchschnittliche Höhe Erntebäume [m]	19.9	20	20	20.1

Abbildung 140 zeigt den tatsächlich existierenden Aufbau des Erschließungssystems. Der Verlauf der Rückegassen unterscheidet sich dabei deutlich von den idealisierten Wegenetzen.

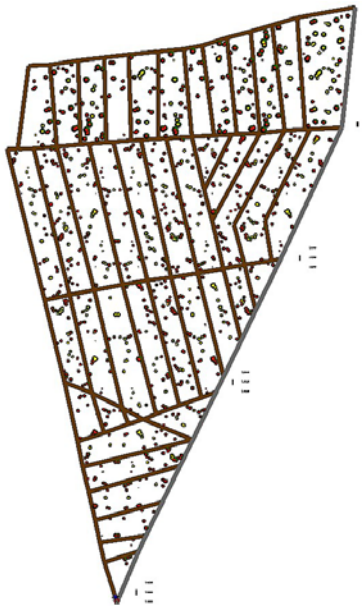


Abbildung 140: Original-Erschließungssystem mit ausscheidendem Bestand (N = 1169)

Wie bereits erwähnt, wurden in dem hier abgebildeten Bestand exakt dieselben Versuche mit denselben Systemeinstellungen durchgeführt wie bei den drei Modellen mit entsprechend veränderten Gassennetzen. Die dabei gewonnenen Daten sollen an dieser Stelle aber nicht in aller Ausführlichkeit dargestellt werden. Während der Versuche traten keine anderen Verhaltensweisen bei den einzelnen Systemen auf als bei den in den Kapiteln 7.1 bis 7.5 beobachteten Simulationsläufen.

Entscheidend ist daher nun der genaue Blick auf die Leistung der einzelnen Systeme bzw. auf die beim Einsatz entstehenden Kosten. Es gilt, die betriebswirtschaftlich bestmögliche System-Kombination für die Durchführung der Holzernte und der anschließenden Rückung des Holzes aus dem Bestand zu finden. Hinzu kommt die Auswahl eines entsprechend am besten geeigneten Erschließungssystems. Der Nutzer hat also die Wahl, aus zwei Arbeitssystemen für die Holzernte (Harvester oder Motormanuelle Holzernte), aus drei Systemen für die Vorrückung bzw. die Rückung (Forwarder, Schlepper, Pferd) sowie aus vier Erschließungsszenarien (Original-Gassennetz und die Varianten mit 20 m, 30 m und 40 m-Abständen) zu wählen.

In der Praxis wird der Entscheidungsträger bei der Planung des Holzernteeinsatzes zuerst den betreffenden Bestand in Augenschein nehmen. In diesem Fall geht es um einen 40 bis 50 Jahre alten Fichtenreinbestand mit einzelbaumweise beigemischter Lärche. Unter dieser Voraussetzung besitzt ein Holzernteeingriff den Charakter einer Durchforstung. Die dabei anfallenden Sortimente sind dem Bestandesalter und der Baumart entsprechend wie folgt definiert (s. Tabelle 60):

Tabelle 60: Anfallende Sortimente + durchschnittliche Stückmasse [fm]

Anfallende Sortimente	Länge [m]	Durchschnittl. Stückmasse [fm]
IS	2,0	0,04
STH	2,4	0,07
CGW	2,5	0.11
PZ[35]	4,0 – 5,0	0.21

Bei diesem Hieb wird kein Langholz ausgehalten. Zusätzlich fällt die durchschnittliche Stückmasse der einzelnen Abschnitte relativ gering aus. Unter diesen Voraussetzungen kommt es aus betriebswirtschaftlicher Sicht automatisch zu einer Einschränkung der Systemkombinationen.

Für die Holzernte stehen die Systeme Harvester und Motormanuelle Holzernte zur Verfügung. Der vorliegende Bestand fällt dabei genau in das typische Arbeitsgebiet eines Harvesters, der im Wesentlichen in schwachen bis mittelstarken, seltener auch in starken Nadelholzbeständen zum Einsatz kommt. Gerade in Beständen mit einer relativ geringen Stückmasse empfiehlt sich der Harvester aufgrund seiner deutlich höheren Produktivität im Vergleich zur Motormanuellen Holzernte. Die Holzernte mit Waldarbeitern wird heute vorzugsweise in starken Nadel- und Laubholzbeständen durchgeführt. Dies hängt mit dem Stückmasse-Gesetz zusammen, welches die Tatsache bezeichnet, dass „bei gleichartiger Bearbeitung von Arbeitsobjekten unterschiedlicher Masse unter gleichartigen Arbeitsbedingungen der Arbeitszeitaufwand pro Stück zunimmt, pro Einheit Masse oder Volumen hingegen abnimmt“ (LÖFFLER, 1991). Die hohen Lohnnebenkosten und die, verglichen mit dem Harvester, relativ geringe Leistungsfähigkeit bei der Motormanuellen Holzernte lassen einen Einsatz von Waldarbeitern im oben beschriebenen Bestand ökonomisch nicht sinnvoll erscheinen. Daher empfiehlt sich grundsätzlich der Harvester als Holzerntesystem.

Allerdings können mit Ausnahme des Bestandesmodells mit einem idealisierten Rückegassenabstand von 20 m und bei einer festgelegten Kranreichweite des Harvesters von 10 m nicht alle Erntebäume direkt von der Maschine aufgearbeitet werden. Die Bäume, die außerhalb des Zugriffsbereiches liegen, müssen also parallel durch drei Waldarbeiter aufgearbeitet werden. Die dabei produzierten Abschnitte können im Anschluss wahlweise durch einen Forstspezialschlepper oder das Rückepferd an die Gassen vorgerückt werden. Dort kommt dann der Forwarder, der auf den Transport von Kurzholz spezialisiert ist, zum Einsatz und rückt die Abschnitte zu den an der Waldstraße gelegenen Poltern. Prinzipiell könnte diese Aufgabe ebenfalls durch den Schlepper ausgeführt werden, allerdings verfügt dieser, ähnlich dem Vergleich von Harvester und Motormanueller Holzernte, im Kurzholzbereich gegenüber dem Forwarder nur über eine geringe Produktivität. Das Haupteinsatzgebiet des Schleppers liegt, neben dem Vorrücken, beim Transport von Langholz an die Waldstraße.

Die Versuche werden unter „ceteris paribus“-Bedingungen durchgeführt. Alle Einstellungen der einzelnen Arbeitssysteme bleiben unverändert, lediglich das Erschließungssystem wird variiert.

[35] PZ = Profilzerspaner (Sortimentsbezeichnung)

7.8 Versuchsergebnisse als Entscheidungsunterstützung

Die Voraussetzungen für einen System-Vergleich sind in Kapitel 7.7 erläutert worden. Die folgenden Tabellen zeigen die Ergebnisse dieser Vergleiche sowohl im Bezug auf die zur Auswahl stehenden Systemkombinationen, als auch hinsichtlich der unterschiedlichen Erschließungssysteme (s. Tabelle 61 bis Tabelle 64).

Tabelle 61: Leistung und Kosten für die Systemkombination Harvester/Motormanuelle Holzernte/Schlepper/Forwarder in Abhängigkeit von vier verschiedenen Erschließungssystemen (grün = günstigste Variante)

Arbeitssystem	Arbeitsaufgabe	20 m RG-Abstand	30 m RG-Abstand	40 m RG-Abstand	Original Erschließungssystem
Harvester	Ernte der Bäume in Reichweite von 10 m [€/fm]	5.47	5.53	5.46	5.60
	Bearbeitete Holzmenge [fm und % - Anteil an der gesamten Erntemenge]	508.7 (100)	353.7 (63.3)	296.6 (50.8)	410.7 (73.0)
	Anteilige, aufsummierte Kosten [€]	2782.6	1956.0	1619.4	2299.9
Motormanuelle Holzernte	Ernte der Bäume außerhalb der Harvester-Reichweite durch drei Waldarbeiter [€/fm]	0 (alle Bäume wurden durch den Harvester geerntet)	10.73	10.66	10.49
	Bearbeitete Holzmenge [fm und % - Anteil an der gesamten Erntemenge]	0	204.7 (36.7)	287.4 (49.2)	151.6 (27.0)
	Anteilige, aufsummierte Kosten [€]	0	2196.4	3063.7	1590.3
Schlepper	Vorrücken [€/fm]	0	3.35	3.35	3.33
	Bearbeitete Holzmenge [fm und % - Anteil an der gesamten Erntemenge]	0	204.7 (36.7)	287.4 (49.2)	151.6 (27.0)
	Anteilige, aufsummierte Kosten [€]	0	685.8	962.8	504.8
Forwarder	Rücken [€/fm]	11.08	10.20	9.78	10.43
	Bearbeitete Holzmenge [fm und % - Anteil an der gesamten Erntemenge]	508.7 (100)	558.4 (100)	584.0 (100)	562.3 (100)
	Anteilige, aufsummierte Kosten [€]	5636.4	5695.7	5711.5	5864.8
∑ [€/fm]		**16.55**	18.86	19.45	18.25

Tabelle 62: Leistung und Kosten für die Systemkombination Harvester/Motormanuelle Holzernte/Pferd/Forwarder in Abhängigkeit von vier verschiedenen Erschließungssystemen (grün = günstigste Variante)

Arbeitssystem	Arbeitsaufgabe	20 m RG-Abstand	30 m RG-Abstand	40 m RG-Abstand	Original Erschließungssystem
Harvester	Ernte der Bäume in Reichweite von 10 m [€/fm]	5.47	5.53	5.46	5.60
	Bearbeitete Holzmenge [fm und % - Anteil an der gesamten Erntemenge]	508.7 (100)	353.7 (63.3)	296.6 (50.8)	410.7 (73.0)
	Anteilige, aufsummierte Kosten [€]	2782.6	1956.0	1619.4	2299.9
Motormanuelle Holzernte	Ernte der Bäume außerhalb der Harvester-Reichweite durch drei Waldarbeiter [€/fm]	0 (alle Bäume wurden durch den Harvester geerntet)	10.73	10.66	10.49
	Bearbeitete Holzmenge [fm und % - Anteil an der gesamten Erntemenge]	0	204.7 (36.7)	287.4 (49.2)	151.6 (27.0)
	Anteilige, aufsummierte Kosten [€]	0	2196.4	3063.7	1590.3
Pferd	Vorrücken [€/fm]	0	18.27	19.15	17.77
	Bearbeitete Holzmenge [fm und % - Anteil an der gesamten Erntemenge]	0	204.7 (36.7)	287.4 (49.2)	151.6 (27.0)
	Anteilige, aufsummierte Kosten [€]	0	3739.9	5503.7	2693.9
Forwarder	Rücken [€/fm]	11.08	10.20	9.78	10.43
	Bearbeitete Holzmenge [fm und % - Anteil an der gesamten Erntemenge]	508.7 (100)	558.4 (100)	584.0 (100)	562.3 (100)
	Anteilige, aufsummierte Kosten [€]	5636.4	5695.7	5711.5	5864.8
∑ [€/fm]		**16.55**	24.33	27.22	22.14

Tabelle 63: Leistung und Kosten für die Systemkombination Motormanuelle Holzernte/Schlepper/Forwarder in Abhängigkeit von vier verschiedenen Erschließungssystemen (grün = günstigste Variante)

Arbeitssystem	Arbeitsaufgabe	20 m RG-Abstand	30 m RG-Abstand	40 m RG-Abstand	Original Erschließungssystem
Motormanuelle Holzernte	Ernte aller Bäume durch drei Waldarbeiter [€/fm]	10.62	10.64	10.62	10.54
	Bearbeitete Holzmenge [fm und % - Anteil an der gesamten Erntemenge]	508.7 (100)	558.4 (100)	584.0 (100)	562.3 (100)
	Anteilige, aufsummierte Kosten [€]	5402.4	5941.4	6202.1	5926.6
Schlepper	Vorrücken [€/fm]	3.35	3.35	3.35	3.33
	Bearbeitete Holzmenge [fm und % - Anteil an der gesamten Erntemenge]	449.0 (88.3)	521.2 (93.3)	550.1 (94.2)	521.7 (92.8)
	Anteilige, aufsummierte Kosten [€]	1504.2	1746.0	1842.8	1737.3

Forwarder	Rücken [€/fm]	11.08	10.20	9.78	10.43
	Bearbeitete Holzmenge [fm und % - Anteil an der gesamten Erntemenge]	508.7 (100)	558.4 (100)	584.0 (100)	562.3 (100)
	Anteilige, aufsummierte Kosten [€]	5636.4	5695.7	5711.5	5864.8
∑ [€/fm]		24.66	23.97	**23.56**	24.06

Tabelle 64: Leistung und Kosten für die Systemkombination Motormanuelle Holzernte/Pferd/Forwarder in Abhängigkeit von vier verschiedenen Erschließungssystemen (grün = günstigste Variante)

Arbeitssystem	Arbeitsaufgabe	20 m RG-Abstand	30 m RG-Abstand	40 m RG-Abstand	Original Erschließungssystem
Motormanuelle Holzernte	Ernte der Bäume außerhalb der Harvester-Reichweite durch drei Waldarbeiter [€/fm]	10.62	10.64	10.62	10.54
	Bearbeitete Holzmenge [fm und % - Anteil an der gesamten Erntemenge]	508.7 (100)	558.4 (100)	584.0 (100)	562.3 (100)
	Anteilige, aufsummierte Kosten [€]	5402.4	5941.4	6202.1	5926.6
Pferd	Vorrücken [€/fm]	17.32	18.27	19.15	17.77
	Bearbeitete Holzmenge [fm und % - Anteil an der gesamten Erntemenge]	448.4 (88.2)	520.0 (93.1)	549.5 (94.1)	519.3 (92.4)
	Anteilige, aufsummierte Kosten [€]	7766.3	9500.4	10522.9	9228.0
Forwarder	Rücken [€/fm]	11.08	10.20	9.78	10.43
	Bearbeitete Holzmenge [fm und % - Anteil an der gesamten Erntemenge]	508.7 (100)	558.4 (100)	584.0 (100)	562.3 (100)
	Anteilige, aufsummierte Kosten [€]	5636.4	5695.7	5711.5	5864.8
∑ [€/fm]		**36.97**	37.85	38.42	37.38

Die oben abgebildeten Kalkulationsergebnisse sind in € pro Festmeter angegeben und werden nun diskutiert. Dabei sollen folgende Abkürzungen für die vier verschiedenen Systemkombinationen gelten:

Harvester/Motormanuelle Holzernte/Schlepper/Forwarder = HMSF

Harvester/Motormanuelle Holzernte/Pferd/Forwarder = HMPF

Motormanuelle Holzernte/Schlepper/Forwarder = MSF

Motormanuelle Holzernte/Pferd/Forwarder = MPF

Wie in Kapitel 7.7 bereits vermutet, finden sich bei den Systemkombinationen HMSF und HMPF tatsächlich die insgesamt günstigsten Kostenwerte, und zwar bei der Simulation auf einem idealisierten Gassensystem mit 20 m-Abständen (s. Tabelle 65). Dabei liegen die Kosten mit 16,55 € pro Festmeter um 1,70 €[36] unter dem zweitbesten Ergebnis (System HMSF, Original-Erschließungssystem). Der Grund für diesen Vorsprung lässt sich mit der Tatsache erklären, dass der Harvester mit einer fest eingestellten Kranreichweite von 10 m bei einem Gassenabstand von 20 m alle Erntebäume relativ problemlos erreichen kann. Eine zusätzliche motormanuelle Fällung derjenigen Bäume, die sich außer Reichweite des Harvesters befinden sowie ein anschließendes Vorrücken ist – im Unterschied zu den anderen drei Erschließungssystemen – nicht notwendig. Dadurch sinken die Kosten gegenüber den anderen Varianten deutlich ab.

Tabelle 65: Rangliste der Systemkombinationen

Reihenfolge	Systemkombination	Erschließungs-system	€/fm
1	**HMSF/HMPF**	**20 m**	**16.55**
2	HMSF	Original	18.25
3	HMSF	30 m	18.86
4	HMSF	40 m	19.45
5	HMPF	Original	22.14
6	MSF	40 m	23.56
7	MSF	30 m	23.97
8	MSF	Original	24.06
9	HMPF	30 m	24.33
10	MSF	20 m	24.66
11	HMPF	40 m	27.22
12	MPF	20 m	36.97
13	MPF	Original	37.38
14	MPF	30 m	37.85
15	MPF	40 m	38.42

Interessanterweise findet sich auf den Plätzen zwei bis vier ebenfalls die Systemkombination HMSF. Diese Kombination liefert unter Einsatz eines Harvesters und der motormanuellen Aufarbeitung der verbliebenen Erntebäume eindeutig die kostengünstigsten Ergebnisse in diesem, für den Harvestereinsatz prädestinierten Bestand. Dazu muss gesagt werden, dass bei den bisher simulierbaren Arbeitssystemen noch keine Zufällung bzw. Beiseilung von Vollbäumen für eine Harvesteraufarbeitung realisiert worden ist. Wären diese Systemvarianten bereits modelliert und einsetzbar, würden die dabei berechneten Ergebnisse wahrscheinlich sogar noch günstiger ausfallen als die der Kombination HMSF.

[36] An dieser Stelle muss darauf hingewiesen werden, dass bei den einzelnen Versuchsläufen Kostensätze pauschal festgelegt wurden. Die genauen Ergebnisse sollen dementsprechend nicht als allgemeingültig und absolut realistisch angesehen werden. Sie besitzen lediglich Beispielcharakter. Wie an anderer Stelle schon erwähnt, ist jeder Nutzer in der Lage, die für ihn individuell gültigen Werte vor Beginn der Simulation selbst festzulegen.

Die günstigsten Ergebnisse, also die der Kombinationen HMSF und HMPF, wurden allerdings bei einer Simulation mit einem idealisierten Rückegassensystem (20 m) erzielt. Diese Erschließungsalternative existiert in der Realität aber nicht. Der Nutzer hat nun zwei Möglichkeiten: Entweder er legt ein neues Gassennetz auf der realen Bestandesfläche an und orientiert sich dabei am Verlauf und der Anordnung im Modell oder er arbeitet mit dem bereits vorhandenen Erschließungssystem weiter. Entscheidet er sich für die zweite Möglichkeit, muss er aus Tabelle 65 das beste Ergebnis heraussuchen, das unter Einsatz des Original-Gassennetzes berechnet worden ist. In diesem Fall findet er es an Position zwei in Form der Kombination HMSF. Diese Kombination scheint bei Betrachtung der Ergebnisse die kostengünstigste für diesen Hieb zu sein. Erst an Position fünf der Rangliste kommt zum ersten Mal ein anderes Arbeitssystem (HMPF) hinzu, das aber bereits deutlich mit Kosten über 20 € pro Festmeter kalkuliert werden muss.

Als Ergänzung zu den oben präsentierten Maschinenkombinationen wird nun noch der Einsatz eines Harvesters mit einer Kranreichweite von 13 m in der Systemkombination HMSF simuliert (s. Tabelle 66). Maschinen mit dieser Reichweite, meistens so genannte Bagger-Harvester, existieren zwar, werden aber in der Regel in sehr viel stärkerem Holz und in schwierigerem Gelände eingesetzt. Die Kosten für diese Maschine werden in der Simulation im Anhalt an die realen Bedingungen um 10 % angehoben.

Tabelle 66: Leistung und Kosten für die Systemkombination Bagger-Harvester (Kranreichweite 13 m!)/Motormanuelle Holzernte/Schlepper/Forwarder in Abhängigkeit von vier verschiedenen Erschließungssystemen (grün = günstigste Variante)

Arbeitssystem	Arbeitsaufgabe	20 m RG-Abstand	30 m RG-Abstand	40 m RG-Abstand	Original Erschließungssystem
Bagger-Harvester	Ernte der Bäume in Reichweite von 13 m inkl. 10 % Kostenerhöhung [€/fm]	6.02	5.78	5.76	5.94
	Bearbeitete Holzmenge [fm und % - Anteil an der gesamten Erntemenge]	508.7 (100)	481.6 (86.2)	392.4 (67.2)	519.3 (92.4)
	Anteilige, aufsummierte Kosten [€]	3062.4	2783.6	2260.2	3084.6
Motormanuelle Holzernte	Ernte der Bäume außerhalb der Harvester-Reichweite durch drei Waldarbeiter [€/fm]	0 (alle Bäume wurden durch den Harvester geerntet)	10.75	10.75	10.04
	Bearbeitete Holzmenge [fm und % - Anteil an der gesamten Erntemenge]	0	76.8 (13.8)	191.6 (32.8)	43.1 (7.6)
	Anteilige, aufsummierte Kosten [€]	0	825.6	2059.7	432.7
Schlepper	Vorrücken [€/fm]	0	3.35	3.35	3.33
	Bearbeitete Holzmenge [fm und % - Anteil an der gesamten Erntemenge]	0	76.8 (13.8)	191.6 (32.8)	43.1 (7.6)
	Anteilige, aufsummierte Kosten [€]	0	257.3	641.9	143.5
Forwarder	Rücken [€/fm]	11.08	10.20	9.78	10.43
	Bearbeitete Holzmenge [fm und % - Anteil an der gesamten Erntemenge]	508.7 (100)	558.4 (100)	584.0 (100)	562.3 (100)
	Anteilige, aufsummierte Kosten [€]	5636.4	5695.7	5711.5	5864.8
∑ [€/fm]		17.10	17.12	18.28	**16.94**

Das Ergebnis zeigt sehr nahe beieinander liegende Werte für die Holzernteaktionen im Originalbestand sowie in den beiden, mit idealisierten Gassensystemen mit Abständen von 20 m und 30 m. Der Einsatz eines Bagger-Harvesters im Originalbestand bringt allerdings im Vergleich mit dem in Tabelle 61 berechneten konventionellen Harvester geringere Kosten mit sich, was durchaus als Argument für diese Maschinenkombination (Bagger-Harvester, Motormanuelle Holzernte, Schlepper und Forwarder) gewertet werden kann. Letztlich bleibt es aber immer dem Nutzer überlassen, welche Holzernte-Variante er für seinen Bestand auf der Basis der simulierten Ergebnisse auswählt.

Der Einsatz der verschiedenen Modelle als Instrument zur Simulation unterschiedlicher Systemkombinationen und damit als Hilfsmittel zur Kalkulation planungsrelevanter Informationen kann mit Blick auf die in diesem Kapitel erläuterten Ergebnisse empfohlen werden. Die errechneten Werte bedeuten eine präzise Datengrundlage, die von einem Entscheidungsträger bei der Suche nach den am besten geeigneten Arbeitssystemen eingesetzt werden kann.

8 Variation tatsächlich existierender Erschließungssysteme

In Kapitel 7 wurden die Möglichkeiten zur freien Gestaltung eines Erschließungssystems für eine bekannte Fläche untersucht. Die Ergebnisse haben gezeigt, dass die Modellierung unterschiedlicher, vom Nutzer frei zu gestaltender Wege- und Gassennetze ohne Einschränkungen durchführbar ist. Diese Option bietet sich besonders für die Planung von Ersterschließungen an, da es in der Praxis wohl nur in seltenen Fällen zu einer kompletten Neustrukturierung bereits existierender Forststraßen und Rückegassen kommt. Welche Möglichkeiten bieten sich dem Anwender der Software aber für den Fall, dass ein modellierter Bestand schon erschlossen ist? Kann der Nutzer beispielsweise einem bestehenden Erschließungssystem weitere Rückegassen hinzufügen und die Auswirkungen dieser Veränderungen auf die Ergebnisse der Simulation verschiedener Arbeitsverfahren in seine Planungsaufgaben mit einfließen lassen?

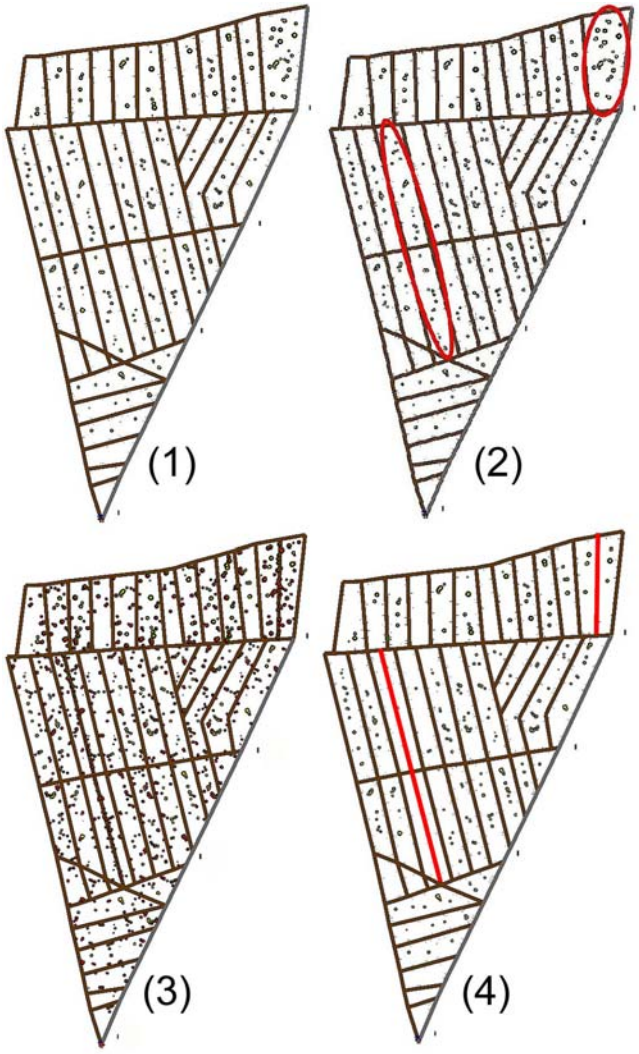


Abbildung 141: (1) Original-Erschließungssystem inkl. Erntebäumen, die vom Harvester nicht erreicht werden können (schwarze Punkte), (2) Rot markierte Bereiche für den Einzug zusätzlicher Rückegassen, (3) Erweitertes Erschließungssystem vor Beginn der Holzernte inkl. Aufhieb, (4) Erweitertes Erschließungssystem mit rot markierten zusätzlichen Rückegassen nach dem Holzernteeingriff durch den Harvester (Kranreichweite 10 m)

Am Beispiel des Testbestandes aus dem Forstamt Paderborn soll diese Fragestellung untersucht werden. Abbildung 141 zeigt unter (1) das bereits bekannte Erschließungssystem, in der Form, in der es in diesem Bestand tatsächlich vorliegt, inklusive derjenigen Erntebäume (schwarze Punkte), die nach einem Eingriff durch den Harvester mit einer vorab definierten Kranreichweite von zehn Metern nicht gefällt und aufgearbeitet werden können, weil sie zu weit von den Rückegassen entfernt stehen. Unter (2) sind zwei rot markierte Bereiche sichtbar, für die sich der Einzug zusätzlicher Rückegassen anbieten würde, um die dort stehenden Erntebäume ebenfalls zu erreichen. Die beiden Bereiche gehören zu denjenigen Flächen, auf denen sich eine relativ große Anzahl an Erntebäumen außerhalb der Kranreichweite des Harvesters befindet. Die maximalen Abstände zwischen den diese Teilflächen abgrenzenden Rückegassen liegen bei 60,3 Metern (im Bestand oben rechts) und 33,3 Metern bzw. 35 Metern (links). Diese Werte zeigen, dass für einen Harvester mit einer Kranreichweite von zehn Metern an diesen Stellen besonders große Flächenteile nicht zugänglich sind. Hier werden im Anschluss insgesamt drei Rückegassen zusätzlich integriert (3), die in diesem Bild vor der Simulation des Holzernteeingriffs dargestellt und daher noch mit Bäumen bestockt sind. Den Abschluss bildet der Aufhieb der neu hinzugekommenen, rot markierten Gassen sowie die Ernte aller weiteren, dafür vorgesehenen Bäume (4). Bereits zu diesem Zeitpunkt ist zu erkennen, dass die Einbindung der drei Gassen zu einer verbesserten Ausbeute bei den für die Ernte ausgewählten Bäumen beiträgt. In den entsprechenden Bereichen werden im Vergleich zu Bild (2) deutlich mehr Erntebäume gefällt und aufgearbeitet.

In diesem Versuch sind nun an beiden markierten Stellen zusätzliche Rückegassen in das Modell integriert worden. Im Anschluss folgt die Simulation des Harvesters, ebenfalls wieder mit einer vorab festgelegten Reichweite von zehn Metern. Die Ergebnisse werden dann mit den berechneten Werten der Holzernte mit dem Original-Erschließungssystem verglichen. Die Versuche werden unter ceteris paribus-Bedingungen durchgeführt.

Tabelle 67: Vergleich der Ergebniswerte der Harvester-Simulation im Testbestand mit Original- und erweitertem Erschließungssystem ohne und mit Einbeziehung des Aufhiebs der zusätzlichen Gassen

Arbeitssystem	Parameter	Original Erschließungssystem	Original Erschließungssystem mit zusätzlichen Rückegassen ohne Aufhieb	Original Erschließungssystem mit zusätzlichen Rückegassen mit Aufhieb	
Harvester (Kranreichweite 10 m)	Anzahl Bäume aufstockender Bestand [Stk.]	7817	7668	7820	
	Anzahl Bäume auf Rückegassen und Forststraßen (werden zum Teil automatisch eliminiert) [Stk.]	2015	2164	2012	
	Anzahl Erntebäume des aufstockenden Bestandes [Stk.]	1169	1150	Gesamt: 1302	davon Aufhieb: 152
	Anteil Erntebäume an aufstockendem Bestand [%]	15	15	16.7	
	Tatsächlich geerntete Bäume [Stk.]	857	897	Gesamt: 1049	davon Aufhieb: 152
	Anteil tatsächlich geernteter Bäume an Gesamtanzahl Erntebäume [%]	73.3	78	80.6	
	Geerntete Holzmenge [fm]	410.7	431.5	Gesamt: 496.5	davon Aufhieb: 65
	RAZ [h]	14.2	15.0	Gesamt: 17.0	davon Aufhieb: 2.0
	Produktivität [fm/h]	29	28.7	29.3	
	fm-Kosten [€/fm]	5.6	5.65	5.54	
	Zurückgelegte Wegstrecke [km]	7.39	8.23	8.23	
	Fahrzeitanteil an der RAZ [%]	23.1	24	21.8	

Die Ergebnisse in Tabelle 67 zeigen die erwartete Wirkung, die von einer Erweiterung des bestehenden Erschließungssystems ausgeht. Lässt man den Aufhieb der drei neuen Gassen außer Acht, ist eine Abnahme der Erntebäume um insgesamt 19 Individuen zu beobachten. Diese 19 Bäume waren im Bestand mit dem unveränderten Erschließungssystem für eine Ernte vorgesehen, fallen nun aber weg, da sie sich in dem Bereich der Fläche befinden, durch den die neuen Gassen verlaufen. Sie werden somit automatisch durch das Programm eliminiert. Die zusätzlich in das bestehende Erschließungsnetz integrierten Rückegassen bewirken allerdings auch eine Zunahme bei den tatsächlich geernteten Bäumen um 40 Stück bzw. eine Zunahme um 4,7 % ihres Anteils an der Gesamtanzahl zu erntender Bäume. Unterm Strich können 20.8 fm zusätzlich geerntet werden, da sich nun mehr Erntebäume in Reichweite des Harvesters befinden als im Original-Bestand.
Der Aufhieb umfasst zusätzlich 152 Bäume, die sich direkt auf den neu angelegten Gassen befinden und deshalb durch den Harvester geerntet werden. Dies entspricht einer Masse von 65 fm. Die Produktivität liegt hier insgesamt, also unter Einbeziehung der 152 Bäume, bei 29,3 fm/h. Die Kosten pro Festmeter (5,54 €) und der Fahrzeitanteil an der RAZ (21,8 %) weisen bei diesem Szenario günstigere Werte auf als bei der Simulation mit dem unveränderten Erschließungssystem. Zwar musste der Harvester 0,84 km mehr Wegstrecke zurücklegen, allerdings wirkt sich dies durch die deutliche Zunahme an Erntemasse nicht negativ auf die Produktivität aus.

Zusammenfassend bewirkt der drei Rückegassen umfassende „Ausbau“ des tatsächlich existierenden Erschließungssystems ohne Berücksichtigung der notwendigen Aufhieb-Arbeiten bei leicht abnehmender Produktivität und einem damit verbundenen, geringfügigen Anstieg der Holzerntekosten eine verbesserte Erreichbarkeit der zur Ernte ausgewählten Bäume. Bezieht man die durch das Freischneiden der neuen Rückegassen anfallende Holzmenge mit ein (was der realen Vorgehensweise entspricht), steigt die Produktivität des Arbeitssystems Harvester bei sinkenden Stückkosten an.
Aus ökonomischer Sicht ist eine Erweiterung des bestehenden Gassennetzes zu empfehlen, der ökologisch relevante Verlust bisher unbeeinflusster Wuchsfläche muss allerdings bei der Planung der weiteren Vorgehensweise bedacht werden. Diese Entscheidung sollte der Nutzer genau abwägen, auch um eine Übererschließung der Fläche zu vermeiden. Davon unbeeinflusst ist festzustellen, dass das Modell in der Lage ist, Modifikationen eines real existierenden Erschließungssystems jedweder Art sowohl abzubilden, als auch deren Auswirkungen auf die verschiedenen Arbeitssysteme bei der Simulation ihrer Einsätze zu berücksichtigen. Für die Planung von Ersterschließungen und die Erweiterung bestehender Gassen- und Wegenetze stehen einem potenziellen Nutzer somit alle denkbaren Variationsmöglichkeiten zur Verfügung.

9 Simulation der Holzernte in einem ausgewählten Bestand über mehrere Altersstufen hinweg

Neben der Einsatzfähigkeit des entwickelten Modells als Entscheidungsunterstützungsinstrument konnte auch die Vielfalt an Variationsmöglichkeiten hinsichtlich des Erschließungssystems und der simulierbaren Arbeitssysteme nachgewiesen werden. Als weitere, für den Nutzer frei veränderbare Variable bleibt nun noch der aufstockende Bestand selbst. In Kapitel 4 wurde die Implementierung des ausgewählten Testbestandes aus dem Forstamt Paderborn in das Modell ausführlich beschrieben. Unter Einsatz des Waldwachstumsgenerators SILVA und der Kalkulationssoftware HOLZERNTE ist es also möglich, jedweden Bestand in stark angenäherter Form am Computer abzubilden. Zusätzlich soll nun geprüft werden, ob man mit dem Modell nicht nur in der Lage ist, dem Praktiker die aktuellen Gegebenheiten des ausgewählten Bestandes für eine Simulation zur Verfügung zu stellen, sondern ihm auch einen „Blick in die Zukunft“ zu ermöglichen. Der Nutzer wäre dadurch in der Lage, die Entwicklung des Bestandes über lange Zeit vorauszuplanen und bereits heute am Computer Holzerntemaßnahmen von morgen zu simulieren. Dabei kann er unter Einsatz der Software HOLZERNTE die Aushaltung der produzierten Sortimente völlig frei gestalten und den jeweils erntekostenfreien Erlös unterschiedlicher Eingriffe über Zeiträume von mehreren Jahrzehnten berechnen.

Der Waldwachstumssimulator SILVA ermöglicht eine Darstellung des Alterungsprozesses eines zuvor definierten Bestandes. Die aktuellen Kennzahlen (Baumartenverteilung, Durchmesser und Höhe des Grundflächenmittelstammes, Baumanzahl) des Auswahlbestandes werden in SILVA eingegeben. Ausgehend von der dreidimensionalen Bestandesstruktur werden Kronenformen aktualisiert, Baumabstände berechnet, Konkurrenten ermittelt, es wird durchforstet, und alle baumrelevanten Informationen werden zusammengeführt und in Zuwachsfunktionen verdichtet, die jeden Baum in Höhe und Durchmesser wachsen lassen. Auch Kronenansatzhöhen und Kronendurchmesser werden der neuen Konkurrenzsituation angepasst. Zudem wird überprüft, ob ein Baum aufgrund von Durchforstungen oder wegen natürlicher Mortalität ausscheidet. Von Periode zu Periode kehrt die Rückkopplung zwischen Struktur und Zuwachs wieder.

Am Ende des Prognosezeitraumes liegen für jeden Baum alle forstwirtschaftlich relevanten Daten vor, etwa zur Durchmesser- und Höhenentwicklung. Darauf aufbauend lassen sich leicht alle bekannten ertragskundlichen Bestandeskennwerte ermitteln. Es folgt die Ausgabe einer Standort-Leistungs-Tafel. Diese hat nicht zum Ziel, repräsentativ für ein Großgebiet zu sein, sondern ist nur typisch für den gerade abgebildeten Bestand. (Quelle: http://www.wwk.forst.tu-muenchen.de, 2006)

Für den Testbestand, der aktuell ein Durchschnittsalter von 45 Jahren aufweist, wird auf diesem Weg eine Liste im ASCII-Format mit einzelbaumweisen Informationen inklusive Definition der Erntebäume, die bei den einzelnen Durchforstungs- bzw. Endnutzungsmaßnahmen entnommen werden, über insgesamt fünf Altersstufen berechnet. Die zeitlichen Abstände zwischen den in AutoMod simulierten Eingriffen betragen jedes Mal exakt 10 Jahre. Diese Vorgehensweise ist rein schematisch angeordnet, um die Möglichkeiten der Simulation über die einzelnen Altersstufen hinweg zu verdeutlichen. Tatsächlich wurden In SILVA alle fünf Jahre Eingriffe simuliert. Um die unterschiedlichen

Auswirkungen der Bestandesalterung auf die Holzernte aber besser darstellen zu können, werden für die hier präsentierten Versuche nur die Eingriffe in Abständen von zehn Jahren betrachtet.
Dem Nutzer liegen also die notwendigen Daten vor, die er für eine Modellierung seiner zukünftigen Bestände benötigt. Im Programm HOLZERNTE kann er im Anschluss die Aushaltung der Sortimente in Abhängigkeit des jeweiligen Bestandesalters frei definieren.
In diesem Beispiel soll nun der ausgewählte Bestand in seiner Entwicklung über die Alterstufen von 45, 55, 65, 75 und 85 Jahren dargestellt werden. Innerhalb dieser fünf Modelle wird im Anschluss ein Holzernteingriff simuliert, wobei in SILVA als Eingriffsart eine mäßige Hochdurchforstung[37] gewählt wird. Die Auswahl der zur Ernte eingesetzten Systemkombination orientiert sich dieses Mal an der Aushaltung der Sortimente und damit an der in der Praxis üblichen Vorgehensweise bei der Holzernte in Fichtenreinbeständen. Zur Übersicht werden jeweils die Erntekosten sowie der erntekostenfreie Erlös auf der Basis der heutigen Kostensätze berechnet, um einen einfachen Überblick über die zusätzlichen Möglichkeiten zu geben, die dem Nutzer nach Anwendung der Software noch zur Verfügung stehen. Diese Berechnungen werden mit Hilfe von durchschnittlichen Holzpreisen aus dem Monat Juli 2006 (IHB, 2006) angestellt.

[37] Eine bemessene Anzahl von Haubarkeitsstämmen (solche, die die Endnutzung erreichen) wird systematisch gefördert. Dazu werden außer den abgestorbenen, absterbenden und kranken Stämmen (Baumklasse 5) auch teilweise diejenigen entnommen, welche die Entwicklung der Haubarkeitsstämme behindern, also Stämme der Klassen 2 und 1 (MOSANDL, 2003).

9.1 Der Originalbestand im durchschnittlichen Alter von 45 Jahren

Der sich im Forstamt Paderborn befindliche Originalbestand mit einem durchschnittlichen Alter von 45 Jahren dient als Ausgangsszenario für die weitere Entwicklung. Zuerst werden noch einmal kurz die tatsächlichen Verhältnisse aufgezeigt (s. Tabelle 68 und Abbildung 142).

Tabelle 68: Bestandes- und Sortimentsinformationen für den Originalbestand mit einem Durchschnittsalter von 45 Jahren

	Stückzahl	%	fm	%	Durchschnittl. Stückmasse [fm]
Anzahl Bäume aufstockender Bestand	**7817**	**100.0**	**---**	**---**	**---**
Anzahl Erntebäume des aufstockenden Bestandes	**1169**	**15.0**	**562.3**	**100.0**	**0,481**
Gesamtanzahl Abschnitte	**5918**	**100.0**	**562.3**	**100.0**	**---**
Sortiment IS 2 m	2359	39.9	80.5	14.3	0.034
Sortiment STH 2.4 m	751	12.7	51.0	9.1	0.068
Sortiment STH 2.5 m	842	14.2	85.6	15.2	0.102
Sortiment PZ kurz 4-5 m	1966	33.2	345.2	61.4	0.176

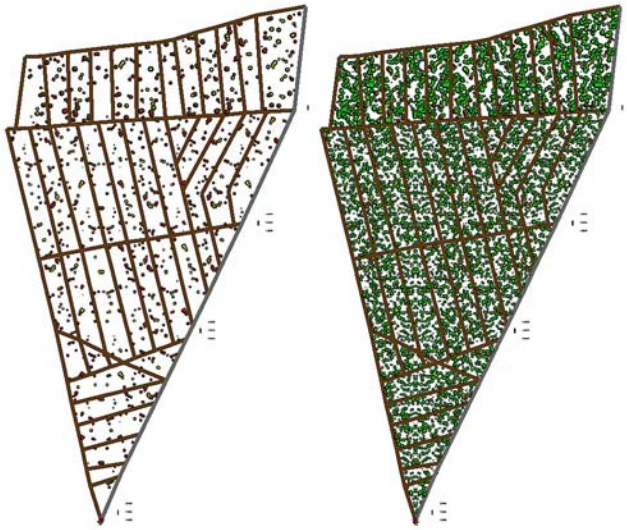


Abbildung 142: Ausscheidender Bestand (links) und gesamter, aufstockender Bestand (rechts) im Durchschnittsalter von 45 Jahren

Im aktuellen Bestand werden insgesamt vier Sortimente ausgehalten, wobei sich das noch relativ geringe Bestandesalter deutlich auswirkt. Als stärkstes Sortiment fallen PZ-Abschnitte mit einer Länge von 4 bis 5 Metern an, die mit einer durchschnittlichen Stückmasse von 0,176 fm zwar ein relativ geringes Volumen besitzen, mit 61,4 % der geernteten Masse aber deutlich dominieren. Die weiteren Sortimente bestehen aus Stammholzabschnitten mit einer Länge von 2,50 m (Qualität CGW) und 2,40 m (Qualität C) sowie kurz ausgehaltenem Industrieholz 2 m.

Wie zuvor in Kapitel 7 erläutert und mit Hilfe des Systemvergleichs nachgewiesen, ist dieser Fichtenreinbestand für eine Aufarbeitung durch das System Harvester prädestiniert. Die Rückung sollte nach Möglichkeit mit einem Forwarder geleistet werden. Allerdings ergibt sich dabei das Problem, dass die Abstände der Rückegassen im Originalbestand in den meisten Fällen deutlich mehr als 20 Meter betragen. Der Harvester kann mit einer definierten Kranreichweite von 10 Metern also nicht alle Erntebäume erreichen. Daher müssen diese Bäume durch Waldarbeiter motormanuell geerntet werden. Dies wiederum führt dazu, dass ein Forwarder die Abschnitte, die auf diese Weise produziert werden, nicht erreichen kann, da sie im Bestand verstreut liegen. Das Vorrücken dieser Abschnitte müsste dann ein Schlepper übernehmen. Die wahrscheinlich günstigere und in der Praxis für solche Fälle vorgesehene Systemkombination aus Harvester, Forwarder und Waldarbeitern, die die nicht erreichbaren Bäume auf die Rückegassen zu fällen, aber nicht aufarbeiten, existiert – wie bereits in Kapitel 7 erwähnt – noch nicht als eigenständige Simulation. Daher muss man an dieser Stelle noch mit der nächstbesseren Lösung kalkulieren. Tabelle 69 zeigt als Kostensatz für diese Eingriffsmethode einen Durchschnittswert von 29,85 € pro Festmeter.

Tabelle 69: Kosten, Leistung und erntekostenfreier Erlös für die Systemkombination Harvester/Motormanuelle Holzernte/Schlepper/Forwarder im Originalbestand mit einem durchschnittlichen Alter von 45 Jahren

Arbeitssystem	Arbeitsaufgabe	Kosten [€/fm]	TAP [fm/MAS]	Kosten gesamt [€]	Erlös gesamt [€]	Erntekostenfreier Erlös [€]
Harvester	Ernte der Bäume in Reichweite von 10 m (857 Bäume, 410.7 fm)	5.60	29.0	Gesamtkosten des Holzernteeingriffs	Erlös aus dem Holzverkauf, sortenweise berechnet (Holzpreise vom Juli 2006, IHB)	Gesamterlös abzüglich der Holzerntekosten
Motormanuelle Holzernte	Ernte der Bäume außerhalb der Harvester-Reichweite durch einen Waldarbeiter (312 Bäume, 151.6 fm)	10.49	1.9			
Schlepper	Vorrücken (1572 Abschnitte, 151.6 fm)	3.33	17.5			
Forwarder	Rücken (5918 Abschnitte, 562.3 fm)	10.43	15.4			
∑		**29.85 €/fm**	**---**	16785 €	28650 €	11865 €

9.2 Der Originalbestand im durchschnittlichen Alter von 55 Jahren

Mit Hilfe des Waldwachstumssimulators SILVA wird der Bestand in seiner Entwicklung um eine Periode von 10 Jahren in die Zukunft projiziert (s. Abbildung 143). SILVA simuliert das zukünftige Wachstum der Bäume unter Berücksichtigung des letzten, in diesem Bestand durchgeführten Eingriffs. Als Ausgangsdaten dienen also die einzelbaumweisen Daten nach dem letzten Eingriff im Durchschnittsalter von 50 Jahren, der zwar, wie eingangs bereits erläutert, in SILVA simuliert wurde, allerdings nicht in Form eines AutoMod-Modells dargestellt wird. Deutlich wird dies bei einem Blick auf Tabelle 70, speziell auf die Baumzahlen des aufstockenden und des ausscheidenden Bestandes. So verringert sich die Anzahl der Bäume auf der Fläche im Vergleich zum zehn Jahre jüngeren Bestand um 1680 auf 6137 Stück und auch die Zahl an Erntebäumen sinkt um 720. Dabei darf allerdings auch nicht außer Acht gelassen werden, dass die Eingriffsstärke beim Hieb mit einem durchschnittlichen Bestandesalter von 55 Jahren unter Berücksichtigung der im Forstamt Paderborn gängigen Praxis von 15 % auf 7.3 % der Bäume des aufstockenden Bestandes gesenkt wurde.

Tabelle 70: Bestandes- und Sortimentsinformationen für den Originalbestand mit einem Durchschnittsalter von 55 Jahren

	Stückzahl	%	fm	%	Durchschnittl. Stückmasse [fm]
Anzahl Bäume aufstockender Bestand	**6137**	**100.0**	**---**	**---**	**---**
Anzahl Erntebäume des aufstockenden Bestandes	**449**	**7.3**	**217.3**	**100.0**	**0.484**
Gesamtanzahl Abschnitte	**1413**	**100.0**	**217.3**	**100.0**	**---**
IS 2 m	42	3.0	0.9	0.4	0.021
IL 3-6 m	443	31.4	28.1	12.9	0.063
STH 4 m	2	0.1	0.6	0.3	0.280
PZ kurz 4-5 m	897	63.5	171.1	78.7	0.191
STH kurz 4-6 m	29	2.1	16.6	7.7	0.574

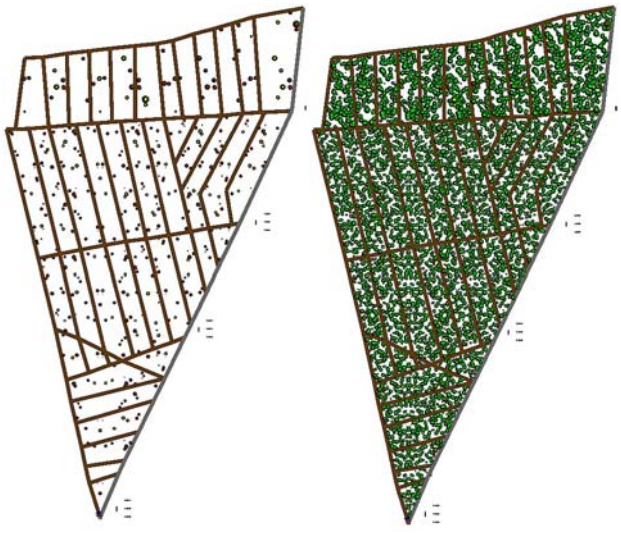


Abbildung 143: Ausscheidender Bestand (links) und gesamter, aufstockender Bestand (rechts) im Durchschnittsalter von 55 Jahren

Betrachtet man nun noch die durchschnittliche Stückmasse der Bäume des ausscheidenden Bestandes, zeigt sich, dass diese sich kaum verändert hat. Diese Erkenntnis führt zu dem Schluss, dass bei diesem Hieb überwiegend dünnere Bäume entnommen werden. Ein Blick auf den durchschnittlichen BHD der Erntebäume zeigt eine Reduktion von etwa einem Zentimeter (s. Kapitel 9.6). Im Zuge der simulierten Durchforstung werden bei diesem Eingriff die schwächeren Individuen entnommen, die sich in den letzten Jahren nicht durchsetzen konnten.
Ein Vergleich der bei diesem Hieb ausgehaltenen Sortimente mit den Sortimenten des zehn Jahre jüngeren Bestandes zeigt, dass sich die Aufteilung der geernteten Stämme bereits deutlich verändert hat (s. Tabelle 70). So kommen die Sortimente „IL 3-6 m“, „STH 4 m“ und „STH kurz 4-6 m“ neu hinzu, wobei gleichzeitig Abschnitte mit einer Länge von 2,4 und 2,5 Metern nicht mehr ausgehalten werden. Hinsichtlich Stückzahl und Masse der produzierten Abschnitte bleibt aber nach wie vor das Sortiment „PZ kurz 4-5 m“ dominierend, wobei die durchschnittliche Stückmasse leicht um 0,015 fm ansteigt.

Tabelle 71: Kosten, Leistung und erntekostenfreier Erlös in €/fm für die Systemkombination Harvester/Motormanuelle Holzernte/Schlepper/Forwarder im Originalbestand mit einem durchschnittlichen Alter von 55 Jahren

Arbeitssystem	Arbeitsaufgabe	Kosten [€/fm]	TAP [fm/MAS]	Kosten gesamt [€]	Erlös gesamt [€]	Erntekostenfreier Erlös [€]
Harvester	Ernte der Bäume in Reichweite von 10 m (340 Bäume, 163.4 fm)	6.65	24.4	Gesamtkosten des Holzernteeingriffs	Erlös aus dem Holzverkauf, sortenweise berechnet (Holzpreise vom Juli 2006, IHB)	Gesamterlös abzüglich der Holzerntekosten
Motormanuelle Holzernte	Ernte der Bäume außerhalb der Harvester-Reichweite durch einen Waldarbeiter (109 Bäume, 53.9 fm)	10.31	2.0			
Schlepper	Vorrücken (344 Abschnitte, 53.9 fm)	3.01	19.3			
Forwarder	Rücken (1413 Abschnitte, 217.3 fm)	11.87	13.6			
∑		**31.84 €/fm**	**---**	6919 €	11034 €	4115 €

Als einzig sinnvolle und in der forstlichen Praxis für diese Art von Beständen im Normalfall eingesetzte Systemkombination wird auch hier wieder die Holzernte der in Reichweite befindlichen Bäume mit dem Harvester sowie die Aufarbeitung der übrig gebliebenen durch Waldarbeiter simuliert. Ein Schlepper rückt die im Bestand verstreut liegenden Abschnitte an die Forststraßen und Rückegassen vor, von wo aus im Anschluss ein Forwarder das Holz zu den Poltern transportiert. Wie zuvor bereits erläutert, wäre die Modellierung und Simulation der motormanuellen Zufällung ganzer Erntebäume in Richtung der Rückegassen mit anschließender Aufarbeitung durch einen Harvester eine weitere, sinnvolle Holzerntevariante, die zur Zeit aber aufgrund mangelnder Daten noch nicht umsetzbar ist. Die Kosten pro Festmeter liegen in diesem Bestand mit 31,84 €/fm knapp zwei Euro höher als bei dem Hieb zehn Jahre zuvor (s. Tabelle 71). Da die errechneten Kosten Ausdruck der individuellen Eigenschaften dieses Modellversuches sind, soll das Ergebnis nicht weiter diskutiert werden. Eine Änderung der Sortimentierung oder der Eingriffsstärke würde andere Kostenwerte verursachen. Ziel dieser Versuchsreihe ist aber der Nachweis für die Darstellung von Alterungsprozessen und deren Auswirkungen auf die Auswahl der eingesetzten Holzerntesysteme sowie auf die entstehenden Holzprodukte.

9.3 Der Originalbestand im durchschnittlichen Alter von 65 Jahren

Der künstliche Alterungsprozess des Testbestandes aus dem Forstamt Paderborn wird mit einer erneuten Anhebung des durchschnittlichen Bestandesalters um zehn auf 65 Jahre fortgesetzt (s. Tabelle 72 und Abbildung 144). Dabei bleibt die Eingriffsstärke gegenüber dem 55 Jahre alten Bestand nahezu unverändert (7,4 %). Die Anzahl der aufstockenden Bäume ist um 958 Stück gesunken, wobei insgesamt 383 Individuen für die Ernte ausgewählt sind. Interessanterweise erhöht sich dabei sogar die Anzahl der produzierten Abschnitte gegenüber dem zehn Jahre zurückliegenden Eingriff um 25, was sich dadurch erklären lässt, dass die Verringerung der Erntebaumzahl um 66 Stück durch das von SILVA simulierte Höhenwachstum innerhalb der letzten zehn Jahre kompensiert wird. Dabei kommt es während der weiteren Bestandesentwicklung von 55 auf 65 Jahre zu einem Höhenzuwachs von durchschnittlich 2,5 Metern. Gleichzeitig steigt auch die durchschnittliche Stückmasse der Erntebäume um ca. 0,13 fm an.

Die Aushaltung der Sortimente bleibt unverändert, allerdings fallen bei diesem Bestand keine Abschnitte für das Sortiment „STH 4 m“ an. Die prozentualen Anteile der Sortimente an der Gesamtanzahl von Abschnitten variiert nur leicht. Während die Anteile der Sortimente „IS 2 m“, „PZ kurz 4-5 m“ und „STH kurz 4-6 m“ jeweils um ca. 2 % zunehmen, sinkt gleichzeitig der Anteil des Sortiments „IL 3-6 m“ um 6,5 % ab. Hinsichtlich der Massenverteilung ist die größte Zunahme bei Sortiment „STH kurz 4-6 m“ festzustellen (+ 5,9 %). Zusätzlich nehmen die Anteile der Sortimente „PZ kurz 4-5 m“ und „IL 3-6 m“ leicht ab, der des Sortiments „IS 2 m“ leicht zu.

Tabelle 72: Bestandes- und Sortimentsinformationen für den Originalbestand mit einem Durchschnittsalter von 65 Jahren

	Stückzahl	%	fm	%	Durchschnittl. Stückmasse [fm]
Anzahl Bäume aufstockender Bestand	**5179**	**100.0**	**---**	**---**	**---**
Anzahl Erntebäume des aufstockenden Bestandes	**383**	**7.4**	**234.3**	**100.0**	**0.612**
Gesamtanzahl Abschnitte	**1438**	**100.0**	**234.3**	**100.0**	**---**
IS 2 m	77	5.4	1.6	0.7	0.020
IL 3-6 m	358	24.9	22.7	9.7	0.063
PZ kurz 4-5 m	945	65.7	178.2	76.1	0.189
STH kurz 4-6 m	58	4.0	31.8	13.6	0.548

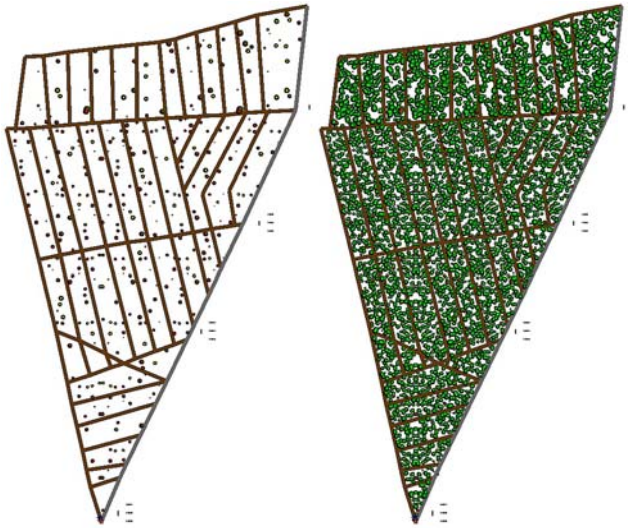


Abbildung 144: Ausscheidender Bestand (links) und gesamter, aufstockender Bestand (rechts) im Durchschnittsalter von 65 Jahren

Da der Anfall an Sortimenten gegenüber dem zehn Jahre zuvor durchgeführten Hieb fast unverändert bleibt und die Dimensionen der Erntebäume es noch zulassen, empfiehlt sich unter Berücksichtigung der praxisnahen Arbeitsweisen auch für dieses Modell nur eine Simulation der Systemkombination Harvester + Motormanuelle Holzernte + Schlepper + Forwarder (s. Tabelle 73). Dabei sinken die Kosten pro Festmeter gegenüber dem Hieb im Alter von 55 Jahren um 1,87 €/fm ab und erreichen damit annähernd wieder das Niveau der Alterstufe von 45 Jahren (29,85 €/fm).

Tabelle 73: Kosten, Leistung und erntekostenfreier Erlös in €/fm für die Systemkombination Harvester/Motormanuelle Holzernte/Schlepper/Forwarder im Originalbestand mit einem durchschnittlichen Alter von 65 Jahren

Arbeitssystem	Arbeitsaufgabe	Kosten [€/fm]	TAP [fm/MAS]	Kosten gesamt [€]	Erlös gesamt [€]	Erntekostenfreier Erlös [€]
Harvester	Ernte der Bäume in Reichweite von 10 m (284 Bäume, 173.8 fm)	5.90	27.5	Gesamtkosten des Holzernteeingriffs	Erlös aus dem Holzverkauf, sortenweise berechnet (Holzpreise vom Juli 2006, IHB)	Gesamterlös abzüglich der Holzerntekosten
Motormanuelle Holzernte	Ernte der Bäume außerhalb der Harvester-Reichweite durch einen Waldarbeiter (99 Bäume, 60.5 fm)	9.59	2.1			
Schlepper	Vorrücken (369 Abschnitte, 60.5 fm)	2.95	19.8			
Forwarder	Rücken (1438 Abschnitte, 234.3 fm)	11.53	14.0			
∑		**29.97 €/fm**	**---**	7022 €	12529 €	5507 €

9.4 Der Originalbestand im durchschnittlichen Alter von 75 Jahren

Die nächste Stufe der Alterung bringt den Testbestand auf ein Durchschnittsalter von 75 Jahren. Der aufstockende Bestand hat im Zuge der Alterung zahlenmäßig um 680 Bäume abgenommen, wobei dieses Mal noch 334 Bäume für die Ernte vorgesehen sind. Der Entnahmeanteil liegt damit unverändert bei 7,4 %. Die Erntebäume besitzen ein durchschnittliches Volumen von 0,91 fm, ein Anstieg gegenüber dem 65 Jahre alten Bestand von fast 0,3 fm. In den vergangenen zehn Jahren gab es also eine deutliche Massenzunahme, die sich auch bei Betrachtung des durchschnittlichen BHD des ausscheidenden Bestandes in Form einer Erhöhung um etwa drei Zentimeter (s. Kapitel 9.6) niederschlägt.

Die gesamte Anzahl an produzierten Abschnitten bleibt auch in diesem Fall nahezu konstant, die Aushaltung erfolgt in der gleichen Art wie zehn Jahre zuvor. Allerdings sind bei den einzelnen Anteilen der Sortimente an der Gesamtstückzahl und –masse deutliche Veränderungen zu beobachten. Während bei den Sortimenten „IS 2 m“ (Stückzahl: -1,9 %, Masse: -0,4 %) und „IL 3-6 m“ (+3,2 %, -1,7%) noch relativ geringe Schwankungen festzustellen sind, kommt es bei „PZ kurz 4-5 m“ und „STH kurz 4-6 m“ zu einer Verschiebung in Richtung des stärkeren Sortiments. Die Stückzahlen des „STH kurz 4-6 m“ nehmen um 8,9 % zu, gleichzeitig reduzieren sie sich beim „PZ kurz 4-5 m“ um 10,1 %. Noch auffälliger ist dieses Phänomen bei den Masseanteilen. Gehörten vor zehn Jahren noch 76,1 % der gesamten Erntemasse zum Sortiment „PZ kurz 4-5 m“, so sind es beim aktuellen Hieb nur noch 57,4 %; ein Minus von 18,7 %. Dagegen steigt fast proportional der Anteil der Masse des Sortiments „STH kurz 4-6 m“ um 20,6 % auf 34,2 % an.

Die simulierte Alterung des Bestandes führt also, genauso wie in der Realität, zu einer Zunahme der Stückmasse einzelner Bäume und Sortimente bei gleichzeitiger Reduktion der Bäume des aufstockenden und, bei gleich bleibender Eingriffsstärke, des ausscheidenden Bestandes (s. Tabelle 74 und Abbildung 145).

Tabelle 74: Bestandes- und Sortimentsinformationen für den Originalbestand mit einem Durchschnittsalter von 75 Jahren

	Stückzahl	%	fm	%	Durchschnittl. Stückmasse [fm]
Anzahl Bäume aufstockender Bestand	**4499**	**100.0**	**---**	**---**	**---**
Anzahl Erntebäume des aufstockenden Bestandes	**334**	**7.4**	**303.8**	**100.0**	**0.910**
Gesamtanzahl Abschnitte	**1439**	**100.0**	**303.8**	**100.0**	**---**
IS 2 m	50	3.5	1.1	0.3	0.021
IL 3-6 m	404	28.1	24.4	8.0	0.060
PZ kurz 4-5 m	800	55.6	174.3	57.4	0.218
STH kurz 4-6 m	185	12.9	104.0	34.2	0.562

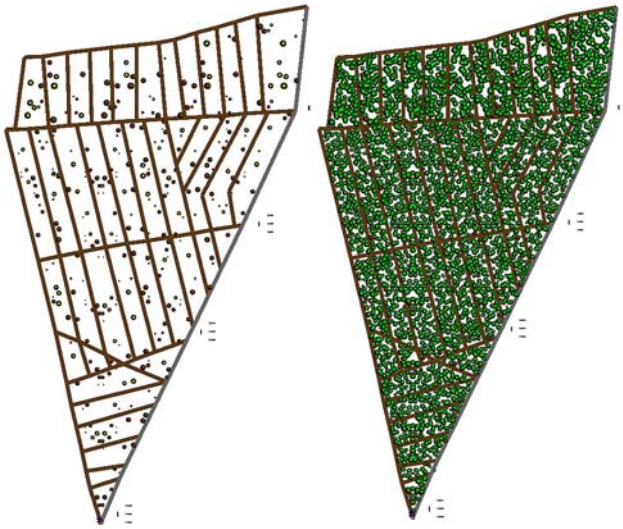


Abbildung 145: Ausscheidender Bestand (links) und gesamter, aufstockender Bestand (rechts) im Durchschnittsalter von 75 Jahren

Die erneut simulierte Systemkombination Harvester + Motormanuelle Holzernte + Schlepper + Forwarder liefert in diesem Bestand ein deutlich günstigeres Ergebnis pro Festmeter als zehn Jahre zuvor; genauer gesagt reduzieren sich die Kosten um 3,08 €/fm (s. Tabelle 75). Dieser Wert ist Ausdruck des Stückmassegesetzes. Die Bäume des aufstockenden und somit auch die Bäume des ausscheidenden Bestandes nehmen über die Jahre an Masse zu. Damit wird ein Einsatz der verschiedenen Arbeitssysteme immer rentabler, da sie nun pro Zeiteinheit mehr Masse produzieren bzw. transportieren können.

Tabelle 75: Kosten, Leistung und erntekostenfreier Erlös in €/fm für die Systemkombination Harvester/Motormanuelle Holzernte/Schlepper/Forwarder im Originalbestand mit einem durchschnittlichen Alter von 75 Jahren

Arbeitssystem	Arbeitsaufgabe	Kosten [€/fm]	TAP [fm/MAS]	Kosten gesamt [€]	Erlös gesamt [€]	Erntekostenfreier Erlös [€]
Harvester	Ernte der Bäume in Reichweite von 10 m (245 Bäume, 209.6 fm)	4.67	34.7	Gesamtkosten des Holzernteeingriffs	Erlös aus dem Holzverkauf, sortenweise berechnet (Holzpreise vom Juli 2006, IHB)	Gesamterlös abzüglich der Holzerntekosten
Motormanuelle Holzernte	Ernte der Bäume außerhalb der Harvester-Reichweite durch einen Waldarbeiter (89 Bäume, 94.2 fm)	8.04	2.5			
Schlepper	Vorrücken (401 Abschnitte, 94.2 fm)	2.65	22.0			
Forwarder	Rücken (1439 Abschnitte, 303.8 fm)	11.53	14.0			
∑		**26.89 €/fm**	**---**	8169 €	17092 €	8923 €

9.5 Der Originalbestand im durchschnittlichen Alter von 85 Jahren

Die letzte Stufe der Alterung erreicht der Bestand im fünften Modell mit einem Durchschnittsalter von 85 Jahren. Die Anzahl an Bäumen auf der Fläche wird nochmals um insgesamt 606 Stück verringert (s. Tabelle 76 und Abbildung 146). Mit 7,7 % liegt die Stärke des Eingriffs dieses Mal etwas höher als zuvor. Die durchschnittliche Stückmasse der Erntebäume steigt nur leicht gegenüber dem zehn Jahre zuvor durchgeführten Hieb an, da erneut eher schwächere Individuen (Rückgang des durchschnittlichen BHD um 1,2 cm) entnommen werden, um die Haubarkeitsstämme zu fördern.
Bei der Aushaltung der Sortimente gibt es allerdings wesentliche Veränderungen zu beobachten. In Anbetracht der Tatsache, dass der Bestand in dieser Altersstufe in den Bereich der Endnutzung übergeht, wird nun vermehrt Langholz produziert. Dominierende Sortimente mit einem zusammengefassten Massenanteil von 79,3 % sind zum einen für den Profilzerspaner vorgesehene, 13 bis 20 Meter lange Stämme („PZ lang 13-20 m“), zum anderen 16 bis 20 Meter lange Stammhölzer („STH lang 16-20 m“). Zusätzlich entstehen bei der Ernte noch Gipfelstücke mit einer Länge von 4 bis 14 Metern („STH Gipfel 4-14 m“), Kurzholzabschnitte („STH 4 m“) sowie lang ausgehaltenes Industrieholz („IL 3-6 m“).

Tabelle 76: Bestandes- und Sortimentsinformationen für den Originalbestand mit einem Durchschnittsalter von 85 Jahren

	Stückzahl	%	fm	%	Durchschnittl. Stückmasse [fm]
Anzahl Bäume aufstockender Bestand	**3893**	**100.0**	**---**	**---**	**---**
Anzahl Erntebäume des aufstockenden Bestandes	**299**	**7.7**	**278.5**	**100.0**	**0.931**
Gesamtanzahl Abschnitte	**704**	**100.0**	**278.5**	**100.0**	**---**
IL 3-6 m	436	61.9	31.2	11.2	0.072
STH 4 m	11	1.6	6.0	2.2	0.549
STH Gipfel 4-14 m	64	9.1	20.6	7.4	0.322
PZ lang 13-20 m	103	14.6	79.6	28.6	0.772
STH lang 16-20 m	90	12.8	141.1	50.7	1.568

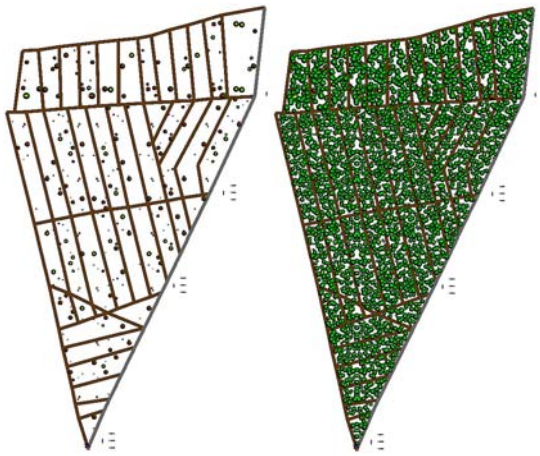


Abbildung 146: Ausscheidender Bestand (links) und gesamter, aufstockender Bestand (rechts) im Durchschnittsalter von 85 Jahren

Die durch die oben beschriebenen Veränderungen in der Zusammensetzung der produzierten Sortimente beeinflusste Wahl der einzelnen Arbeitssysteme reduziert sich bei der Holzernte auf die motormanuelle Fällung und Aufarbeitung und bei der Rückung auf den Einsatz eines Schleppers. Das zu großen Teilen über 10 Meter lange Stammholz kann aus Gründen der eingeschränkten Länge des Rungenkorbes nicht durch einen Forwarder gerückt werden, daher übernimmt der Schlepper diese Aufgabe. Auch die kürzeren Stammabschnitte werden von ihm zuerst vorgeseilt und anschließend aus dem Bestand gerückt, da sich der zusätzliche Einsatz eines Forwarders für die Rückung von nur 13,4 % der geernteten Holzmasse nicht rentiert. Der Harvester fällt als Option für den Holzeinschlag weg, da die Langholz-Aushaltung in dieser Form die Leistungsfähigkeit der Maschinen überschreitet.
Tabelle 77 zeigt das Kalkulationsergebnis für Waldarbeiter und Schlepper. Die Stückkosten pro Festmeter liegen bei diesem Hieb sehr viel niedriger, als bei den vier jüngeren Beständen zuvor. Ausschlaggebend dafür ist die im Vergleich zu den vorherigen Einsätzen zurückgegangene Anzahl an eingesetzten Arbeitssystemen. Die beiden verbliebenen Systeme übernehmen nun die gesamten Holzernteaufgaben. Dies ist allerdings nur aufgrund der großen Anteile der Langholzsortimente an der Gesamterntemasse möglich. So machen die drei Sortimente „STH Gipfel 4 – 14 m“, „PZ lang 13 – 20 m“ und „STH lang 16 – 20 m“ alleine bis zu 86,7 % der zu erntenden Holzmasse aus. Dementsprechend bewirkt das Stückmassegesetz einen sehr rentablen Einsatz der beiden Arbeitssysteme.

Tabelle 77: Kosten, Leistung und erntekostenfreier Erlös in €/fm für die Systemkombination Motormanuelle Holzernte/Schlepper im Originalbestand mit einem durchschnittlichen Alter von 85 Jahren

Arbeitssystem	Arbeitsaufgabe	Kosten [€/fm]	TAP [fm/MAS]	Kosten gesamt [€]	Erlös gesamt [€]	Erntekostenfreier Erlös [€]
Motormanuelle Holzernte	Ernte der Bäume außerhalb der Harvester-Reichweite durch einen Waldarbeiter (299 Bäume, 278.5 fm)	8.39	2.4	Gesamtkosten des Holzernteeingriffs	Erlös aus dem Holzverkauf, sortenweise berechnet (Holzpreise vom Juli 2006, IHB)	Gesamterlös abzüglich der Holzerntekosten
Schlepper	Vorrücken und Rücken (704 Abschnitte bzw. Stämme, 278.5 fm)	5.10	11.5			
∑		**13.49 €/fm**	**---**	3757 €	15911 €	12154 €

9.6 Zusammenfassung der Ergebnisse der Alterungsversuche

Fünf Perioden der Entwicklung des Testbestandes aus dem Forstamt Paderborn wurden modelliert. Der aufstockende Bestand wurde dabei, ausgehend von seinem aktuellen Durchschnittsalter (45 Jahre) mit Hilfe des Waldwachstumssimulators SILVA durch Simulation einer mäßigen Hochdurchforstung um vierzig Jahre in die Zukunft versetzt. Neben Veränderungen bei der Baumanzahl, dem durchschnittlichen BHD, der durchschnittlichen Höhe des aufstockenden und des ausscheidenden Bestandes und der Eingriffsstärke wurden auch die Auswirkungen auf die Aushaltung der Sortimente sowie die Holzerntekosten deutlich.
Die Anzahl der Bäume des aufstockenden und des zu erntenden Bestandes nehmen im Verlauf des Alterungsprozesses naturgemäß ab (s. Abbildung 147). Insgesamt kommt es zu einer Reduktion um 3924 Bäume auf der Fläche, die Anzahl der Erntebäume verringert sich proportional zur Anzahl der aufstockenden Bäume immer weiter. Wurden bei der Ernte im Durchschnittsalter von 45 Jahren noch 1169 Bäume gefällt, sind es im Alter von 85 Jahren nur noch 299 Stück. Die Eingriffsstärke bleibt bis auf den ersten Hieb (45 Jahre, 15 % Entnahme) fast unverändert und liegt im Mittel bei etwa 7,5 %.

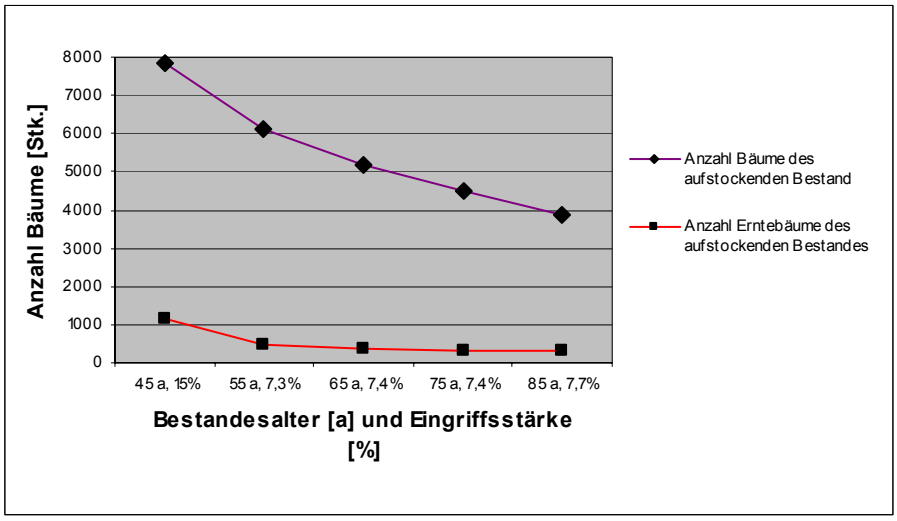


Abbildung 147: Vergleich der Anzahl an Bäumen des aufstockenden Bestandes und an Erntebäumen unter Einfluss der Anhebung des durchschnittlichen Bestandesalters von 45 auf 85 Jahre und der Variation der Eingriffsstärke

Hinsichtlich des Dicken- und Höhenwachstums entwickeln sich die Bäume des gesamten aufstockenden und des zu erntenden Bestandes realitätsgetreu (s. Abbildung 148). Der durchschnittliche BHD (+ 12,6 cm) und die durchschnittliche Höhe (+ 11,4 m) des aufstockenden Bestandes nehmen stetig zu, ebenso wie die durchschnittliche Höhe des ausscheidenden Bestandes (+ 7,9 m). Lediglich der Verlauf des durchschnittlichen BHD der Erntebäume weist im durchschnittlichen Bestandesalter von 55 Jahren und 85 Jahren einen Einbruch auf. In diesen Altersstufen wurden in SILVA eher schwächere Individuen zur Förderung der verbleibenden Bäume im Zuge der mäßigen Hochdurchforstung für die Ernte ausgewählt.

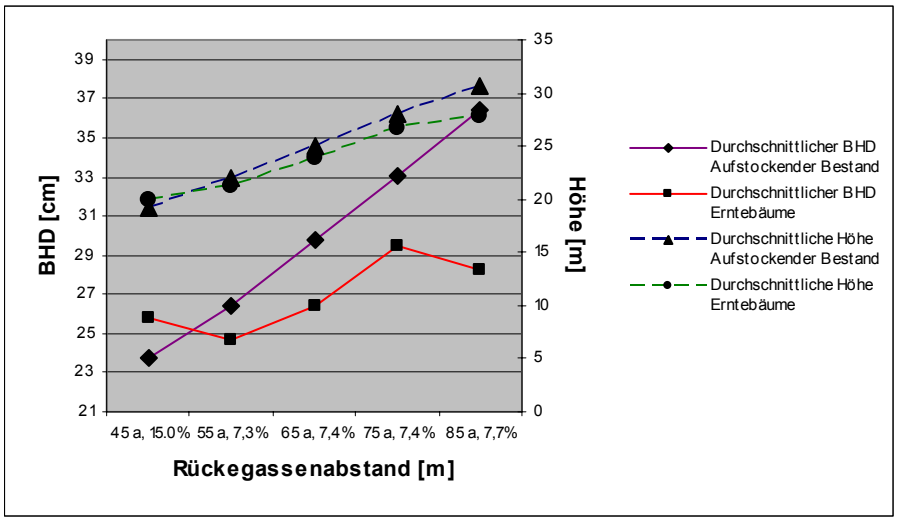


Abbildung 148: Vergleich des durchschnittlichen Brusthöhendurchmesser und der durchschnittlichen Höhen des aufstockenden Bestandes und der Erntebäume über den simulierten Entwicklungszeitraum von 40 Jahren hinweg

Das stetige Wachstum in Höhe und Breite der aufstockenden Bäume über die einzelnen Altersstufen hinweg, schlägt sich deutlich in der Aushaltung der produzierten Abschnitte nieder (s. Abbildung 149). Die Massenanteile der unterschiedlichen Sortimente liegen bei einem Durchschnittsalter von 45 Jahren noch ausschließlich im Bereich der besonders kurzen Sortimente („IS 2 m“, „STH 2,4 m“, „STH 2,5 m“ und „PZ kurz 4-5 m“), im weiteren Verlauf der Bestandesentwicklung verschiebt sich der Anteil aber über die stärkeren Kurzholzsortimente („PZ kurz 4-5 m“, „STH kurz 4-6 m“, „IL 3-6 m“) in Richtung des Langholzes („STH Gipfel 4-14 m“, „PZ lang 13-20 m“, „STH lang 16-20 m“).

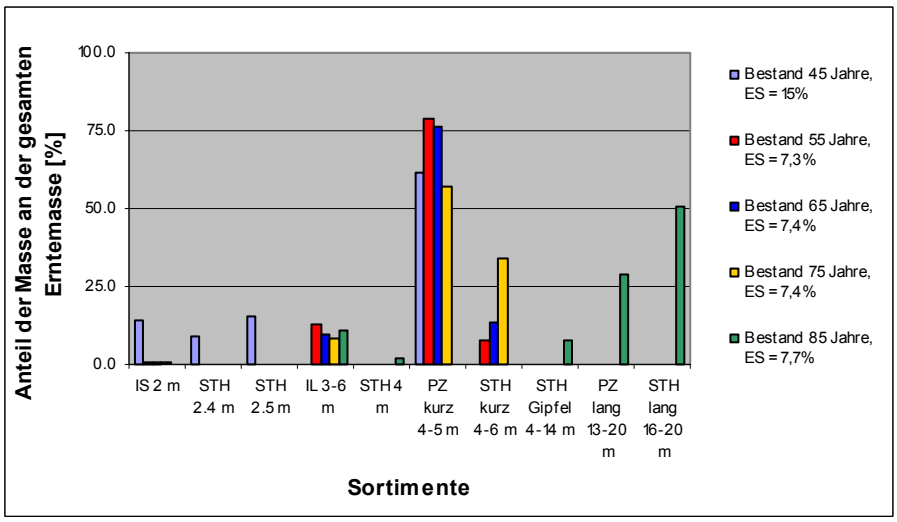


Abbildung 149: Anteil der Masse der einzelnen Sortimente an der gesamten geernteten Masse unter Einfluss der Anhebung des durchschnittlichen Bestandesalters von 45 auf 85 Jahre und der Variation der Eingriffsstärke (ES)

Die mit dem Alterungsprozess einhergehende Massenzunahme lässt sich auch durch den Vergleich der durchschnittlichen Stückmassen über die einzelnen Sortimente hinweg nachweisen (s. Abbildung 150). Im Durchschnittsalter von 45 Jahren belegen die Stückmassen noch Werte zwischen 0,03 und 0,18 fm, 40 Jahre später liegen sie bei 0,07 bis 1,57 fm.

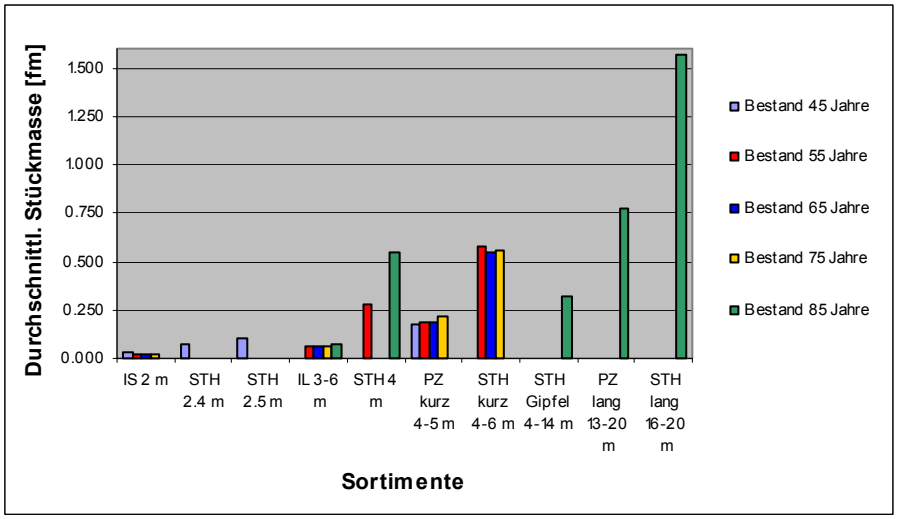


Abbildung 150: Veränderung der durchschnittlichen Stückmasse über die einzelnen Sortimente hinweg unter Einfluss der Anhebung des durchschnittlichen Bestandesalters von 45 auf 85 Jahre

In Abbildung 151 ist noch einmal der Verlauf der Holzerntekosten sowie der TAP der verschiedenen Arbeitssysteme über die einzelnen Entwicklungsstufen des Testbestandes verteilt zu sehen. Beim ersten simulierten Hieb im Alter von 45 Jahren liegt die Eingriffsstärke noch bei 15 %, daher kann besonders der Harvester trotz geringer Stückmasse der einzelnen Bäume bzw. Sortimente besonders produktiv arbeiten. Zehn Jahre später ist die Eingriffsstärke fast halbiert worden, die Leistung des Harvesters geht zurück (– 4,6). Da die TAP bei der Motormanuellen Holzernte zwar etwas zunimmt (+ 0,1), die des Forwarders aber gleichzeitig reduziert wird (- 1,8), kommt es zu einem Anstieg der Kosten um 1,99 €/fm.

Im Alter von 65 Jahren sinken die Kosten dann um 1,87 € ab, da Harvester (+ 3,1), Waldarbeiter (+ 0,1), Schlepper (+ 0,5) und Forwarder (+ 0,4) bei diesem Hieb ihre Produktivität steigern können. Dies hängt bei fast identischer Eingriffsstärke wie zehn Jahre zuvor mit dem Anstieg der durchschnittlichen Stückmasse bei den einzelnen Sortimenten zusammen (s. Abbildung 150). Das Stückmassegesetz wirkt sich also auch hier wieder positiv auf das Gesamtergebnis aus.

Der gleiche Effekt lässt sich auch zehn Jahre später (Bestandesalter 75 Jahre) wieder beobachten. Obwohl die Eingriffsstärke exakt gleich bleibt (7,4 %), steigt die TAP von Harvester (+ 7,2), Motormanueller Holzernte (+ 0,4) und Schlepper (+ 2,2) an. Erst im Alter von 85 Jahren gibt es trotz weiterhin zunehmender Stückmasse deutliche Veränderungen bei den Kosten und der Produktivität. Die Umstellung bei der Aushaltung der Sortimente verursacht den Wegfall des Harvesters als Holzernte- und des Forwarders als Rückesystem. Die Waldarbeiter arbeiten zwar mit fast gleicher Produktivität weiter (- 0,1), allerdings verursacht der nun auf alle Sortimente bezogene Einsatz des Schleppers eine Reduktion der TAP (- 10,5), da die Maschine die gesamte Erntemasse nicht nur vorrücken, sondern auch erstmals bis zum Polter transportieren muss. Die dabei entstehenden, unproduktiven Fahrzeiten wirken sich negativ auf die TAP aus. Trotzdem sinken die Kosten pro Festmeter bei diesem Holzernteeinsatz stark ab, da nur noch zwei Arbeitssysteme im Einsatz sind.

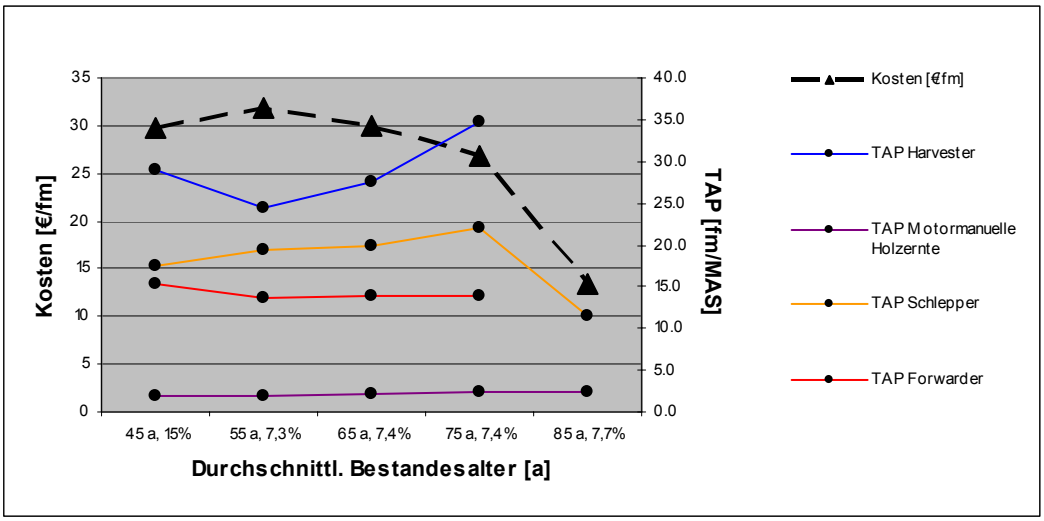


Abbildung 151: Veränderung der Holzerntekosten und der Technischen Arbeitsproduktivität [TAP] unter Einfluss der Anhebung des durchschnittlichen Bestandesalters von 45 auf 85 Jahre

Die Zusammenfassung der gewonnen Ergebnisse erlaubt folgende Schlüsse: Das entwickelte Simulationsmodell ist nicht nur in der Lage, jedweden real existierenden Bestand in Kombination mit einer Auswahl von Arbeitssystemen abzubilden, es kann vielmehr unter Einsatz der Programme SILVA und HOLZERNTE auch die weitere Entwicklung dieser Bestände und deren Auswirkung auf die Holzernte simulieren. Dem Nutzer ist es somit möglich, nicht nur kurzfristig, sondern auch über ausgedehnte Zeiträume hinweg Einsichten und wichtige Informationen über den Bestand zu erhalten, die er als Grundlage seiner aktuellen und langfristigen Planungen einsetzen kann. Fragestellungen nach der anzuwendenden, waldbaulichen Behandlungsmethode kombiniert mit an den kommenden Entwicklungen ausgerichteten Kostensätzen geben ihm neue Möglichkeiten der Entscheidungsunterstützung an die Hand. Auch Fragen in der Art „Wie sollte das Erschließungssystem im Hinblick auf die Holzernte in 20 Jahren ausgerichtet werden?“ oder „Welcher Anteil an Stammholz lässt sich beim nächsten Hieb gewinnen?“ sind nun besser zu beantworten. Das Modell beweist damit eine bisher nicht erreichte Komplexität und Präzision bei der Kombination waldbaulicher und forsttechnischer Informationen.

Hinzu kommt die besondere Anschaulichkeit der Entwicklung einzelner Bestände durch die graphische Darstellung der Simulation. So fällt beispielsweise auf, dass bei den Abbildungen der Modellbestände der verschiedenen Alterstufen aus der Vogelperspektive bei ungenauem Hinsehen keine besonderen Unterschiede zu erkennen sind. Tatsächlich entsteht dieser Effekt aber durch die wirklichkeitsgetreue Modellierung der individuellen Baumproportionen. Über den Zeitraum von 40 Jahren verringert sich zwar nachweislich die Anzahl der aufstockenden Bäume, gleichzeitig nehmen aber Stamm und Kronen (auch graphisch) an Umfang zu. Das Bild des Bestandes scheint sich also nicht zu verändern, da die Beschirmung der Fläche weiterhin gleich bleibt.

10 Validierung der Modellfunktionen

Bei der Modell-Validierung werden für konkrete Parameterkonstellationen die Rechenergebnisse den zu modellierenden, realen Phänomenen gegenübergestellt. Die gesuchten Größen müssen in geplanten Experimenten empirisch ermittelt und mit den Rechenergebnissen verglichen werden. Die Grundfragen der Modell-Validierung richten sich nach dem Grad der Übereinstimmung mit den zu modellierenden realen Vorgängen. Man muss die Genauigkeit, die Zuverlässigkeit, das Modellverhalten und die Datenkonstellationen beachten. Bei einem auf diese Weise validierten Modell wird nachgewiesen, dass das reale System als Modell hinreichend genau nachgebildet werden kann.
Im Bereich der Holzerntesimulation ist es aufgrund der starken Heterogenität forstlicher Strukturen sehr aufwendig, Validierungsversuche in ausreichender Anzahl durchzuführen. Nach Ansicht der Modellentwickler sollte die Einwertung der vom Modell berechneten Ergebnisse anhand von mindestens fünf verschiedenen Versuchsszenarien auf ihre Genauigkeit hin überprüft werden. Diese Arbeiten sind allerdings mit einem erheblichem Zeit- und Kostenaufwand verbunden und konnten daher nicht vollständig im Rahmen des hier beschriebenen Projektes durchgeführt werden. Sozusagen als „erste Stufe“ der Modell-Validierung beobachtete POHL (2006) eine Holzerntemaßnahme in jenem Testbestand des Forstamtes Paderborn, der bereits in AutoMod modelliert worden war. Die mit Hilfe von vorab erfolgten Einmessungen und während der Holzernte durchgeführten Zeitstudien erhobenen Systemdaten wurden nach Reproduktion der tatsächlichen Verhältnisse im Modell mit den am Computer berechneten Ergebniswerten verglichen. Zusätzlich wurden im Anschluss die Berechnungsergebnisse des Modells auf Basis einer Literaturstudie mit sechs weiteren Zeitstudien aus unterschiedlichen Quellen verglichen. Die genaue Vorgehensweise wird in den nun folgenden Kapiteln erläutert.

10.1 Erhebung von Bestandes- und Systemdaten zu Validierungszwecken

Für den ersten Validierungsversuch entschied man sich, eine Holzernteoperation in demjenigen Testbestand durchführen zu lassen und zu beobachten, der bereits als Simulationsmodell existiert. Dabei handelt es sich um den etwa 11 ha großen, im Durchschnitt 45 Jahre alten Fichtenreinbestand des FBB Büren. Als Pflegemaßnahme war ein Durchforstungseingriff vorgesehen, der mit dem für diese Art von Beständen bevorzugten Einsatz der Arbeitssysteme Harvester und Forwarder durchgeführt wurde.
Für den Validierungsversuch wurde eine Teilfläche mit einer Größe von 4,5 ha ausgewählt, auf der 382 Bäume des ausscheidenden Bestandes nummeriert und gleichzeitig in ihrer Höhe, ihrem BHD und unter Einsatz eines GPS und eines Theodoliten in ihrer Position vermessen wurden. Die dabei erhobenen Werte konnten dann in das AutoMod-Modell übertragen und dort abgebildet werden (s. Abbildung 152). Im Unterschied zur bisherigen Vorgehensweise bei der Darstellung einzelner Bäume im Modell, wurden dieses Mal alle wichtigen Größen der Erntebäume, die sich tatsächlich auf der ausgewählten Fläche befanden, direkt vor Ort eingemessen. Die Zuhilfenahme des

Waldwachstumssimulators SILVA war somit nicht notwendig, vielmehr gelang es zum ersten Mal, eine real existierende Bestandessituation 1:1 in ein Holzerntemodell zu überführen.

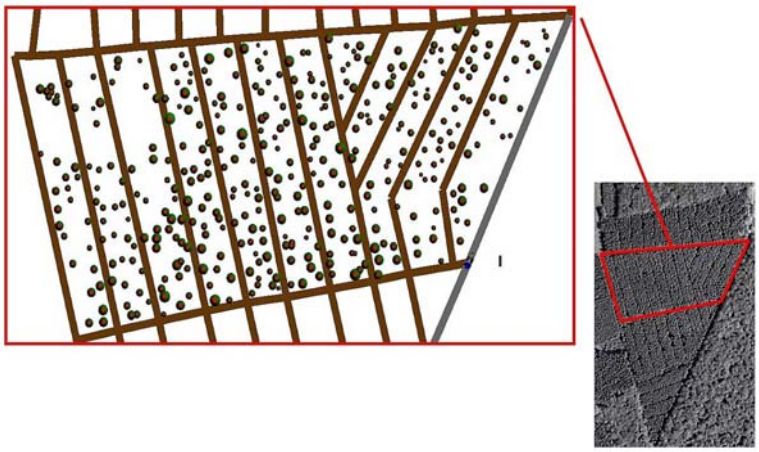


Abbildung 152: Abbildung der 4,5 ha großen Teilfläche des Testbestandes inkl. der Erntebäume in AutoMod

Alle 382 Erntebäume stehen im Modell an exakt den Positionen, an denen sie auch in der Realität stehen, und auch die eingemessenen Werte über BHD und Höhe der Bäume wurden entsprechend zugeordnet. Über den bereits zuvor genutzten Weg zur Herleitung der produzierten Sortimente mit Hilfe der Software HOLZERNTE konnten auch die während der Zeitstudie aufgenommenen Anteile der einzelnen Abschnitte für den Einsatz im Modell berechnet und den Erntebäumen zugeordnet werden.
Damit sind sämtliche bestandesspezifische Größen vorhanden, die für eine Validierung der einzelnen Arbeitssysteme notwendig sind.

10.2 Validierungsversuche zu den Arbeitssystemen Harvester und Forwarder

Für diese Art von Durchforstung üblich - und daher auch eingesetzt - ist die Kombination der Arbeitssysteme Harvester und Forwarder. Bei der angestrebten Validierung der insgesamt fünf simulierbaren Arbeitssysteme sind gerade diese beiden von besonderer Bedeutung, da sie ihre Ergebnisgrößen im Gegensatz zu den Systemen Motormanuelle Holzernte, Schlepper und Pferd mit speziellen Produktivitätsformeln und nicht mit Hilfe von Tarifwerken berechnen.
Die Anwendung von Tarifen macht eine Validierung zwar nicht überflüssig, sie gibt dem Nutzer des Modells allerdings im Hinblick auf die Ergebnisqualität eine deutlich höhere Sicherheit als die Anwendung von Produktivitätsformeln für einzelne Teilarbeitsschritte. Der Unterschied besteht darin, dass alle drei Tarife (EST, Schlepper- und Pferde-Tarif des Landes NRW) bereits seit geraumer Zeit zur Verlohnung eingesetzt und daher auch regelmäßig überarbeitet und an die aktuellen Verhältnisse angepasst wurden. Dagegen stammen die Produktivitätsformeln aus Projektarbeiten und Langzeitstudien. Sie wurden bisher noch nicht für die Kalkulation unterschiedlicher Holzernteszenarien eingesetzt, was eine genaue Überprüfung ihrer Funktionalität somit noch nicht ermöglichte.

Bei der Auswertung wird erwartet, dass das Modell realitätsnahe Daten zu beiden Arbeitssystemen errechnet. Als reale Vergleichsdaten dienen dabei die aus der dafür speziell durchgeführten Zeitstudie erhobenen Größen sowie sechs weitere Studien, die im Rahmen einer Literaturrecherche als geeignet ausgewählt wurden.
Besonderes Augenmerk gilt der Technischen Arbeitsproduktivität (fm/MAS) bzw. der Reinen Arbeitszeit (fm/h), da diese am besten die Leistungsfähigkeit eines Holzernteverfahrens widerspiegeln. Eine geringe Schwankung der TAP von ein bis drei Festmetern pro Maschinenarbeitsstunde gilt dabei als tolerabel, größere Abweichungen sollten nach Möglichkeit nicht auftreten. Die Technische Arbeitsproduktivität hängt von der Reinen Arbeitszeit, der Anzahl an Unterbrechungen < 15 Minuten und vom tatsächlich geernteten Gesamtvolumen bzw. von den Stückmassen der einzelnen Abschnitte ab. Differenzen von ein bis zwei Stunden bei den Ergebnissen der Maschinenarbeitsstunden können bei der Holzernte in der Praxis als unwesentlich eingestuft werden. Erst wenn es sich um größere Abweichungen handelt, muss das Ergebnis kritisch betrachtet werden. Schwankungen von einem bis zu zwanzig Festmetern beim geernteten Gesamtvolumen fallen im Vergleich mit der Realität nicht sonderlich ins Gewicht, jedoch sollten sie nicht wesentlich mehr voneinander abweichen. Bei den Stückmassen muss man zwischen den Sortimenten differenzieren. So wirken sich zum Beispiel geringe Abweichungen des durchschnittlichen Stückvolumens um 0,001 fm beim Industrieholz wesentlich stärker auf die Produktivität des Systems aus, als bei stärkeren Sortimenten (z.B. LPZ).
Für die Gesamtarbeitszeit (GAZ) gilt ebenso, dass Abweichungen zwischen Modell und Realität von wenigen Minuten bis hin zu einem halben Tag für die Anwendung der Ergebnisse auf die Praxis tolerierbar sind. Werden die Differenzen jedoch so groß, dass man sich im Größenbereich von mehreren Tagen wieder findet, muss das Modellergebnis als nicht brauchbar eingestuft werden.

10.2.1 Validierungsversuche mit dem System Harvester

Die im Testbestand mit Hilfe von Zeitstudien beobachtete Ernte der 382 Bäume durch den Harvester dauerte insgesamt etwa 15 Stunden und 25 Minuten. Während dieser Zeit wurde der Harvester bei seiner Arbeit durch den Bestand begleitet und folgende Daten erhoben:

- Fahrtroute der Maschine
- Reihenfolge der geernteten Bäume
- Fahrgeschwindigkeiten auf der Gasse und auf der Forststraße [km/h]
- Dauer der Teilarbeitschritte pro geerntetem Baum [Sek]:
    - Positionieren des Aggregates am Baum
    - Fällen und Aufarbeiten des Baumes
    - Sonstiges Kranen
    - Technische Entnahme einzelner, nicht zur Ernte vorgesehener Bäume
    - Unterbrechungen
- Anzahl und Art der produzierten Abschnitte [Stk.]

Die gesammelten Daten wurden im Anschluss ausgewertet und zum Teil in das Modell übernommen. Dabei handelt es sich um die Informationen über die Fahrgeschwindigkeiten, die Fahrtroute der Maschine und die Reihenfolge der geernteten Bäume. Alle weiteren Ergebnisse wurden für den Vergleich der realen Zeitstudie mit den Modellergebnissen verwendet.

Nachdem die produzierten Sortimente und ihre Anteile in HOLZERNTE reproduziert (s. Tabelle 78) und die Voreinstellungen der unterschiedlichen Systemparameter im Frontend des Harvesters an die realen Gegebenheiten angepasst wurden, konnte mit der Simulation der Holzernte begonnen werden. Der Harvester hielt dabei im Modell exakt dieselbe Fahrtroute wie in der Realität ein und erntete die dafür vorgesehenen Bäume ebenfalls in der gleichen Reihenfolge. Als Zeitgrad wurde der Wert 100 festgelegt, d.h. die Produktivitätsformeln bleiben bei der Berechnung der einzelnen Werte unbeeinflusst. Dieses Vorgehen ist Voraussetzung, um die Tauglichkeit der Formeln für ihren weiteren Einsatz im Modell zu testen. Störungen wurden aufgrund der geringen Dauer des Holzernteeingriffs und der damit auftretenden „Probleme“ des Störzeitenmoduls nicht simuliert.

Tabelle 78: Stück- und Massenanteile der einzelnen Sortimente der durchgeführten Zeitstudie im Vergleich zu den in HOLZERNTE berechneten Werten

Sortiment =>	LPZ (4,5 m, 5 m)	CGW (2,5 m)	Palette (2,40 m)	IS (2 m)	∑
Stückzahl - Anteile Zeitstudie [%]	30 %	14 %	18 %	38 %	**100 %**
Stückzahl - Anteile HOLZERNTE [%]	32 %	13 %	16 %	39 %	**100 %**
Volumen - Anteile Zeitstudie [%]	58 %	13 %	12 %	17 %	**100 %**
Volumen - Anteile HOLZERNTE [%]	62 %	15 %	10 %	13 %	**100 %**
Geerntete Masse während der Holzernte im Bestand und im Modell [fm]					**216**
Anzahl geernteter Bäume während der Holzernte im Bestand und im Modell [Stk.]					**382**

Tabelle 79: Gegenüberstellung der Harvester-Ergebnisse aus Zeitstudie und Simulation

Beobachtete Parameter	Ergebnisse Zeitstudie	Ergebnisse Simulation (Zeitgrad 100)
Anzahl Erntebäume [Stk]	382	382
Geerntete Masse [fm]	216.33	216.04
Durchschnittl. Dauer des Prozesses Positionieren [Sek]	19.1	20.2
Durchschnittl. Dauer der Prozesse Fällen & Aufarbeiten [Sek]	52.3	27.3
GAZ [h:min:sek]	15:24:52	06:27:00
RAZ [h:min:sek]	09:20:43	06:27:00
AZ [h:min:sek]	06:04:09	0 (es wurden keine Unterbrechungen simuliert)
Produktivität RAZ [Efm/h]	23.26	33.52

Die berechneten Ergebnisse weisen an unterschiedlichen Stellen Abweichungen auf (s. Tabelle 79). Besonders deutlich treten diese bei der durchschnittlichen Dauer der Prozesse Fällen & Aufarbeiten zu Tage. Im Durchschnitt verlaufen diese Arbeiten im Modell (27,3 Sekunden) fast doppelt so schnell wie in der Realität (52,3 Sekunden). Dies hat Auswirkungen auf die RAZ, die im Modell mit 387 Minuten um 174 Minuten geringer ausfällt als tatsächlich beobachtet (561 Minuten). In letzter

Konsequenz liegt die Produktivität im Modell um über zehn Festmeter pro Stunde höher als in der Praxis.
Dieses Ergebnis führte auf den ersten Blick zu der Annahme, dass das Modell bei der Simulation des Harvesters „zu schnell“ rechnet. Sozusagen als „Bremse“ wurde in weiteren Versuchen der Zeitgrad bis auf den Wert 42 reduziert, bei dem die Ergebnisse schließlich am nächsten beieinander lagen (s. Tabelle 80).

Tabelle 80: Gegenüberstellung der Harvester-Ergebnisse aus Zeitstudie und Simulation mit reduziertem Zeitgrad 42

Beobachtete Parameter	Ergebnisse Zeitstudie	Ergebnisse Simulation (Zeitgrad 42)
Anzahl Erntebäume [Stk]	382	382
Geerntete Masse [fm]	216.33	216.04
Durchschnittl. Dauer des Prozesses Positionieren [Sek]	19.1	32.0
Durchschnittl. Dauer der Prozesse Fällen & Aufarbeiten [Sek]	52.3	43.1
GAZ [h:min:sek]	15:24:52	09:22:00
RAZ [h:min:sek]	09:20:43	09:22:00
AZ [h:min:sek]	06:04:09	0 (es wurden keine Unterbrechungen simuliert)
Produktivität RAZ [Efm/h]	23.26	23.08

Die sehr starke Reduktion des Zeitgrades bringt die gewünschte Angleichung der Ergebnisse. „Bremst“ man den Fahrer bzw. das Modell auf diese Weise herunter, liegen die Simulationsergebnisse in einem zufrieden stellenden Bereich, da RAZ und Produktivität nahezu gleiche Werte besitzen. Diese Erkenntnis wirft allerdings eine entscheidende Frage auf:

> „Liegt es tatsächlich an den einzelnen Formeln aus den finnischen Langzeitstudien, mit denen die Leistung der Teilarbeitsschritte im Modell berechnet wurde, dass das Ergebnis so deutlich über den in der Praxis erhobenen Werten liegt oder sind die Formeln evtl. doch besser geeignet als der erste Eindruck schließen lässt?“

Um eine Antwort auf diese Frage und damit Sicherheit hinsichtlich der Qualität der im Modell eingesetzten Produktivitätsformeln zu erhalten, wurden im Rahmen einer Literaturstudie sechs weitere Zeitstudien ausgewählt, analysiert und deren Ergebnisse mit denen der Simulation verglichen (s. Tabelle 81).

Tabelle 81: Übersicht über die für einen Leistungsvergleich ausgewählten Zeitstudien

Eingesetzte Maschine + Eingriffsart	Bestandeskennzahlen	Formel	Quelle
Formeln Modell (verschiedene Timberjack-Maschinen)	**Fichte, mittl. BHD = 28 cm, mittl. Baumvolumen = 0.58 Efm**	**s. Kapitel 5.6.1.2 Aufbau und Einsatz der Kalkulationsformeln**	**PAUSCH, 2004 (Auswertung Langzeitstudie Finnland)**
Ponsse HS 15, Erstdurchforstung	Fichte, mittl. BHD = 15 cm, mittl. Baumvolumen = 0.12 Efm	RAZ [Min/Baum] = 0.0838 * (BHD [cm])$^{0.73271}$	RIEHLE, 1997
Timberjack 1270 A, Zweitdurchforstung	Fichte, mittl. BHD = 20.3 cm, mittl. Baumvolumen = 0.29 Efm	RAZ [Efm/h] = exp [4.071689 + 0.492 * ln (Baumvolumen [Efm] – 0.0957 * (ln (Baumvolumen [Efm]))^2 – 0.151 * ln (Entfernung zur Gassenmitte [m])	PAUSCH, 1999
Timberjack 1270 A, Altdurchforstung	Fichte, mittl. BHD = 28 cm, mittl. Baumvolumen = 0.75 Efm	RAZ [Efm/h] = exp [3.8917 + 0.246 * ln (Baumvolumen [Efm] – 0.346 * (ln (Baumvolumen [Efm]))^2 – 0.053 * ln (Entfernung zur Gassenmitte [m])	PAUSCH, 1999
Timberjack 1270 A, Durchforstung	Fichte, mittl. BHD = 23 cm, mittl. Baumvolumen = 0.75 Efm	RAZ [Min/Baum] = 0.52 – 0.0017 * BHD [cm] + 0.0008 * (BHD [cm])^2	GUGLHÖR, 1995
Timberjack 1270 A, Durchforstung	Fichte, mittl. BHD = 24 cm, mittl. Baumvolumen = nicht bekannt	RAZ „Positionieren des Aggregats“ [Sek/Baum] = EXP (1.86 + 0.041 * Entfernung zur Gassenmitte [m]); RAZ „Fällen und Aufarbeiten“ [Sek/Baum] = 21.9 + 0.9 * Entfernung zur Gassenmitte [m] + 12.8 * Baumvolumen [Efm] + 23.2 * Baumvolumen [Efm]^2	BOLLIN, 1998
Impex Raupenharvester Hannibal, Altdurchforstung	Fichte, mittl. BHD = 38 cm, mittl. Baumvolumen = 1.19 Efm	RAZ [Efm/h] = exp [3.724 + 0.624 * ln (Baumvolumen [Efm]) – 0.198 * [ln (Baumvolumen [Efm]))^2]	FELLER, WEIXLER, PAUSCH, 1997

Vorweg ist noch einmal darauf hinzuweisen, dass die Daten, mit deren Hilfe die verschiedenen Formeln für die einzelnen Teilarbeitsschritte im Modell entwickelt werden konnten, aus Langzeitstudien der Firma Timberjack aus Finnland stammen (PELTOLA, 2004). Timberjack stellte weitere Informationen zu den beobachteten Hieben zur Verfügung, aus firmeninternen Gründen aber nur in begrenztem Umfang. So wurden keine Angaben über die Erschließungsverhältnisse, die Geländebedingungen, die Eingriffsart und die Maschinenführer gemacht. Bekannt waren aber teils

Durchschnitts-, teils direkt zugeordnete Werte über die geernteten Bäume (Art, Alter, Dimensionen) und die produzierten Stammabschnitte (Anzahl, Dimensionen).

Trotz der nicht als ideal zu bezeichnenden Ausgangslage wurde entschieden, diese Daten in Ermangelung besser geeigneten Materials als Grundlage für die Entwicklung der einzelnen Formeln zu verwenden. Wie sich nun zeigt, könnten bei den finnischen Langzeitstudien in Fichtenreinbeständen im Vergleich zu der in Deutschland beobachteten Holzerntemaßnahme andere Verhältnisse geherrscht haben. Die errechnete Produktivität bei einem Zeitgrad von 100 (33,5 Efm/h) liegt in einem Bereich, der darauf schließen lässt, dass in Finnland zum Zeitpunkt der Datenerhebungen gute Erntebedingungen vorgeherrscht haben müssen. Produktivitäten in dieser Größenordnung lassen sich bei sehr homogenen Bestandesstrukturen, einer nicht zu geringen Stückmasse, einer hervorragenden Erschließungssituation, einem erfahrenen Maschinenführer und eventuell einem nicht unerheblichen Anteil von Kahlschlägen an den insgesamt beobachteten Eingriffen durchaus erzielen. Es ist bekannt, dass diese Verhältnisse in Skandinavien generell eher anzutreffen sind als in Mitteleuropa, daher ist die deutliche Abweichung der Ergebnisse evtl. mit diesem Argument zu begründen. Auf der anderen Seite könnte allerdings auch die Leistung des während der Referenzzeitstudie beobachteten Maschinenführers insgesamt in einem unterdurchschnittlichen Bereich gelegen haben. Dies sollte durch den Vergleich mit den in Tabelle 81 aufgeführten Studien aber besser beurteilt werden können.

Im Bezug auf die Vergleichbarkeit der ausgewählten Zeitstudien mit den im Modell eingesetzten Formeln, scheinen die vier mit einem Timberjack 1270 A durchgeführten Hiebe sowohl hinsichtlich der eingesetzten Maschine, als auch hinsichtlich der durchschnittlichen Werte für BHD und Baumvolumen am besten geeignet. Die Daten der Langzeitstudien, auf deren Basis die einzelnen Formeln des Modells entwickelt wurden, stammen ebenfalls von der Firma Timberjack und wurden im Wesentlichen bei Beobachtungen von Harvestern des Typs 1270 A und 1470 A gesammelt.

Im Folgenden wurden nun die einzelnen Studien nacheinander mit den Ergebnissen des Modells verglichen. Nach entsprechender Transformation der Formeln konnten alle Produktivitätsvergleiche auf der Ebene der Reinen Arbeitszeit [Efm/h] durchgeführt werden. Dabei ist es wichtig, sich vor Augen zu führen, dass es sich um die RAZ handelt! Entsprechend hohe Produktivitätswerte (z.B. 60 Efm/h bei ausreichend großer Stückmasse) sind daher nicht unnormal.

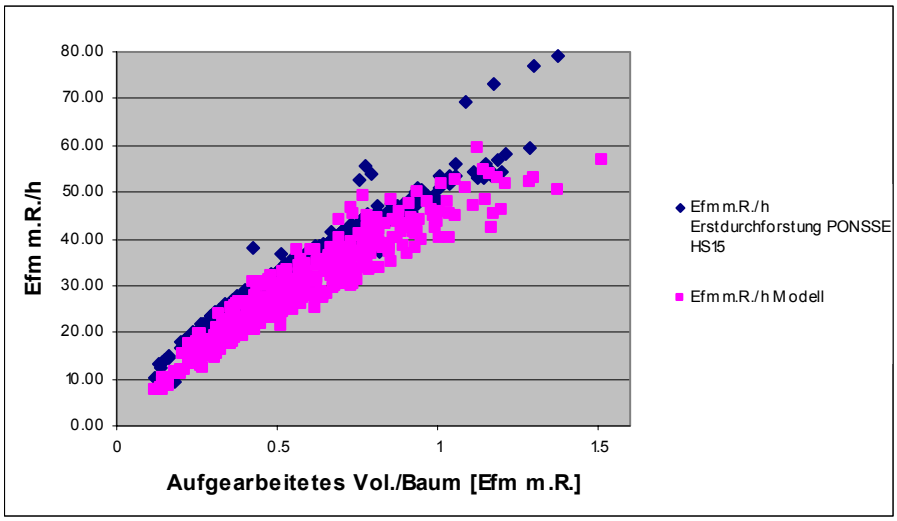


Abbildung 153: Efm m.R./h im Vergleich der Berechnungen der Formeln des Versuchs "Erstdurchforstung von Fichte mit einem PONSSE HS15" (RIEHLE, 1997) mit Berechnungen der Produktivitätsformeln des Modells nach PAUSCH (2004) (N = 367)

Auch wenn der Ponsse HS 15 in diesem Fall in einer Erstdurchforstung gearbeitet hat und der bearbeitete Fichtenbestand im Durchschnitt deutlich unter den Werten des Modellbestandes liegt (mittl. BHD = -13 cm, mittl. Baumvolumen = -0.46 Efm), ist die Übereinstimmung der Leistungswerte doch relativ deutlich (s. Abbildung 153). Vereinzelte Ausreißer bei der Leistung des Ponsse HS15 finden sich lediglich in den Volumenbereichen 0,5 Efm/Baum, 0,7 Efm/Baum und 1,0 bis 1,4 Efm/Baum.

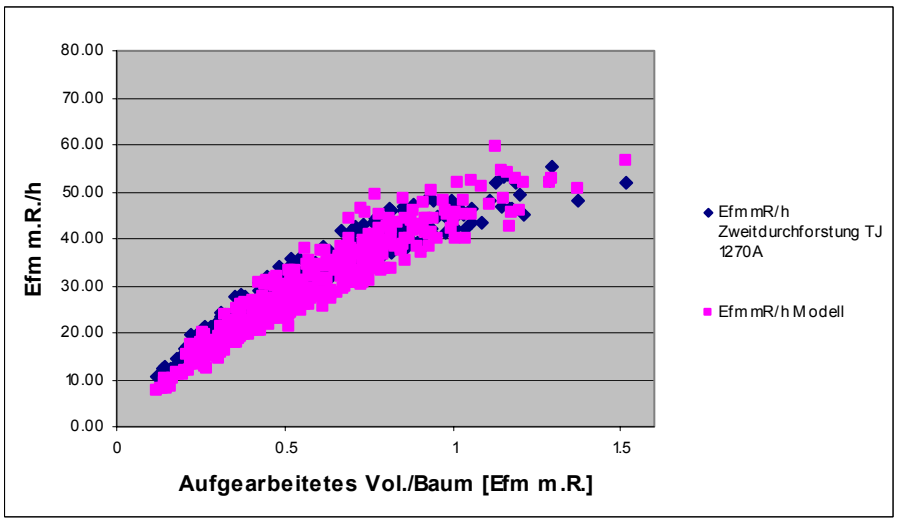


Abbildung 154: Efm m.R./h in Abhängigkeit des aufgearbeiteten Volumens jedes einzelnen Baumes im Vergleich des Versuchs "Zweitdurchforstung von Fichte mit einem TJ 1270A" (PAUSCH, 1999) mit Berechnungen der Produktivitätsformeln nach PAUSCH (2004) im Modell (N = 367)

Der Verlauf der Werte bei dieser Studie mit einem Timberjack 1270 A in einer Zweitdurchforstung liegt im unteren Bereich (0.1 - 0.5 Efm/Baum) sehr nahe an dem des Ponsse HS 15 (s. Abbildung 154). Die

Produktivität des simulierten Harvesters liegt von 0,1 bis ca. 0,7 Efm/Baum ein klein wenig unterhalb der Produktivität des beobachteten Timberjack 1270 A. Danach liegen die Werte aber übereinstimmend beisammen. Insgesamt unterstützt der Vergleich der Modellleistung mit dieser Durchforstungsstudie die Plausibilität der im Modell berechneten Leistungswerte deutlich.

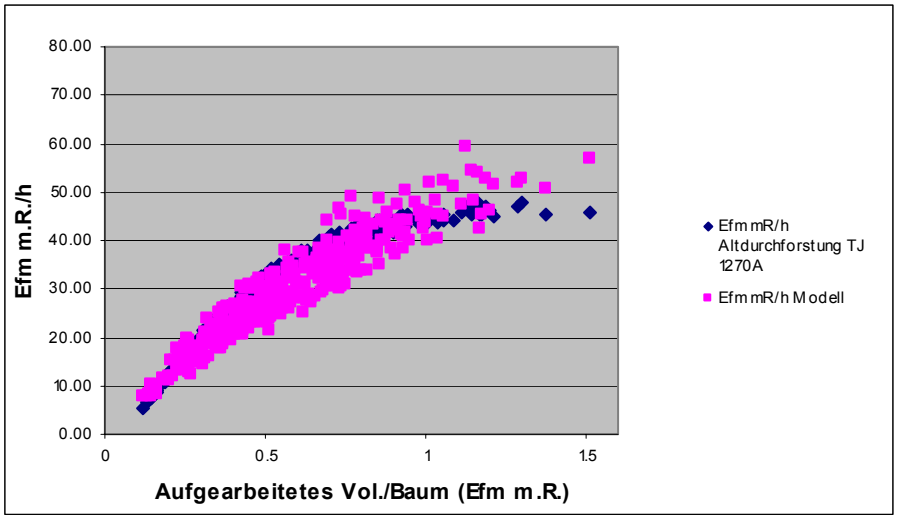


Abbildung 155: Efm m.R./h in Abhängigkeit des aufgearbeiteten Volumens jedes einzelnen Baumes im Vergleich des Versuchs "Altdurchforstung von Fichte mit einem TJ 1270 A" (PAUSCH, 1999) mit Berechnungen der Produktivitätsformeln nach PAUSCH (2004) im Modell (N = 367)

Mit einem identischen mittleren BHD von 28 cm und einem um nur 0.17 Efm/Baum abweichenden mittleren Baumvolumen waren die Voraussetzungen für einen Vergleich des hier beobachteten Harvesters Timberjack 1270 A in einer Altdurchforstung von allen sechs ausgewählten Studien die besten. Wie zu erwarten war, liegen auch die Ergebnisse sehr eng beieinander (s. Abbildung 155), wobei bei diesem Vergleich der Abfall der Produktivität des 1270 A gegenüber der Modellsimulation ab einem Volumen von etwa 1,2 Efm/Baum zu beobachten ist. Als Grund wird der Einsatz stärkerer Harvester während der Langzeitstudie vermutet, auf deren Daten die im Modell eingesetzten Formeln basieren (PELTOLA, 2004). Dabei handelte es sich um Maschinen des Typs Timberjack 1470 A, die in ihrer Leistungsfähigkeit dem 1270 A überlegen sind (GABRIEL, 2002). Dennoch unterstützt dieser Versuch ebenfalls eine weitere Verwendung der aktuellen Modellformeln bei zukünftigen Simulationen.

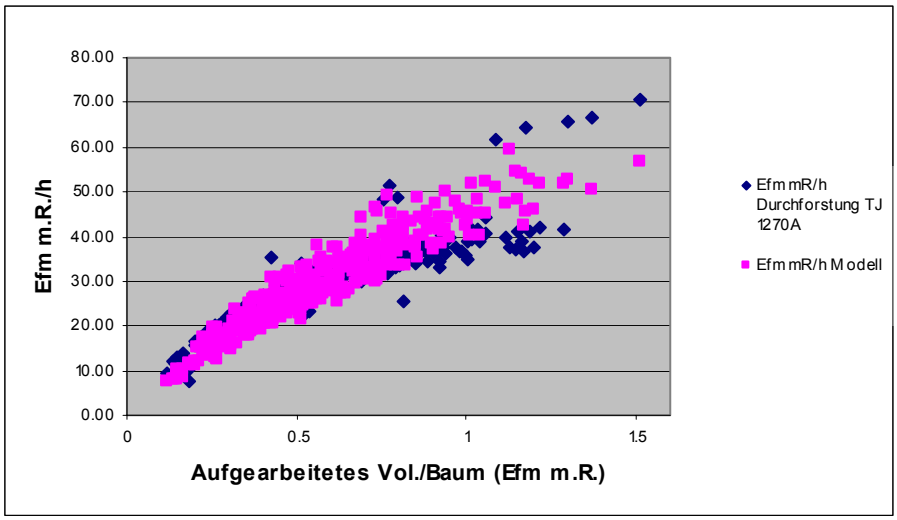


Abbildung 156: Efm m.R./h in Abhängigkeit des aufgearbeiteten Volumens jedes einzelnen Baumes im Vergleich des Versuchs "Durchforstung von Fichte mit einem TJ 1270 A" (GUGLHÖR, 1995) mit Berechnungen der Produktivitätsformeln nach PAUSCH (2004) im Modell (N = 367)

Beim diesem Vergleich des Timberjack 1270 A in einer Durchforstung mit dem Modell fallen die etwas höhere Produktivität im unteren Volumenbereich (0,1 – 0,3 Efm/Baum) sowie der Abfall der Leistung im Bereich > 0.9 Efm/Baum auf. Allerdings liegen bei diesem Versuch auch zahlreiche Leistungswerte im stärkeren Holz in einer dem Modell ähnlichen Größenordnung (s. Abbildung 156). Es bestätigt sich aber dennoch, dass die in der Simulation verwendeten Formeln durchaus plausible Werte berechnen.

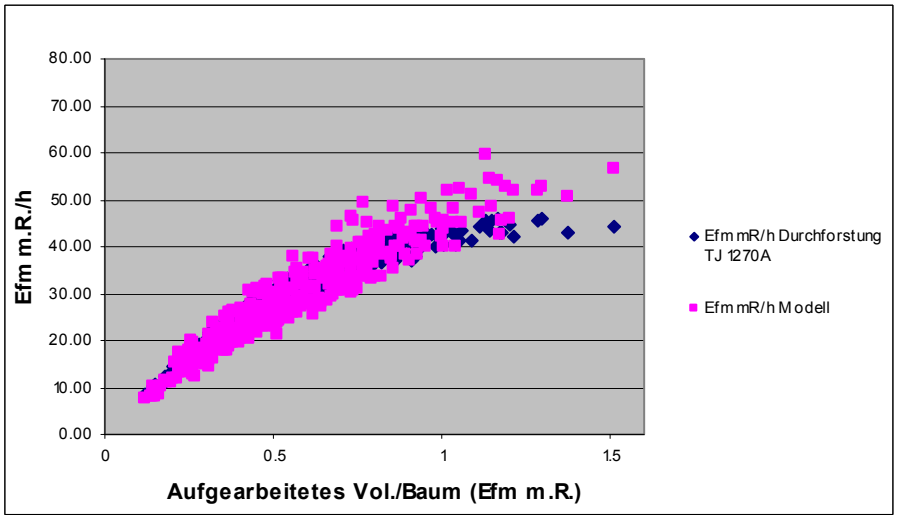


Abbildung 157: Efm m.R./MAS in Abhängigkeit des aufgearbeiteten Volumens jedes einzelnen Baumes im Vergleich des Versuchs " Durchforstung von Fichte mit einem TJ 1270 A" (BOLLIN, 1998) mit Berechnungen der Produktivitätsformeln nach PAUSCH (2004) im Modell (N = 367)

Den Anmerkungen, die bereits zuvor zu den Studien des Timberjack 1270 A gemacht worden sind, ist nichts weiter hinzuzufügen. Der Verlauf der Kurve weicht lediglich im Volumenbereich > 1,0 Efm/Baum von denen der im Modell simulierten Maschine ab (s. Abbildung 157). An dieser Stelle sei lediglich

noch erwähnt, dass die in dieser Abbildung verglichenen Formeln eines Durchforstungseingriffs aus der Diplomarbeit von BOLLIN (1998) stammen.

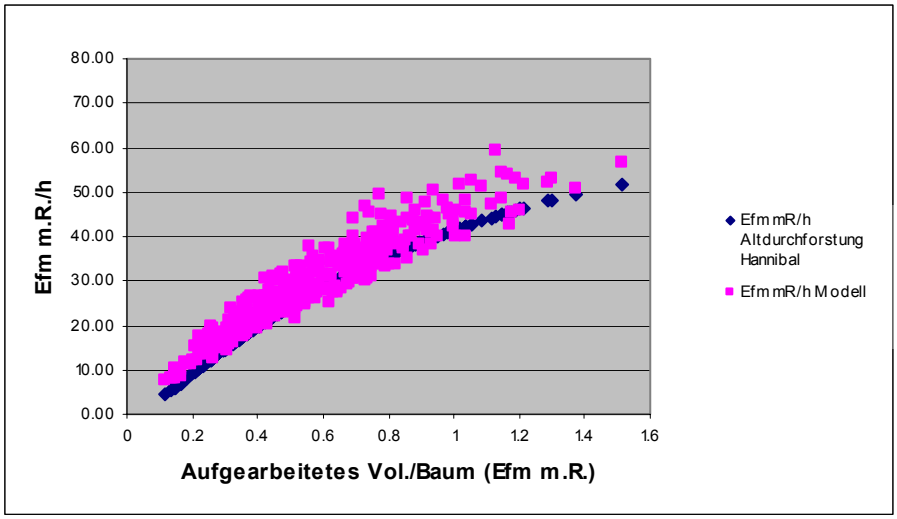


Abbildung 158: Efm m.R./h in Abhängigkeit des aufgearbeiteten Volumens jedes einzelnen Baumes im Vergleich des Versuchs "Altdurchforstung von Fichte mit dem Starkholzharvester Hannibal" (FELLER, WEIXLER, PAUSCH, 1997) mit Berechnungen der Produktivitätsformeln nach PAUSCH (2004) im Modell (N = 367)

Auch wenn der Vergleich mit einem Starkholzharvester wie dem hier eingesetzten „Hannibal“ der Firma Impex nicht unbedingt zwingend erscheint, so zeigen die Ergebnisse doch auch in diesem Fall eine deutliche Übereinstimmung der Leistungswerte, auch im höheren Volumenbereich ab 1,0 Efm/Baum (s. Abbildung 158). Dies kann erneut als Zeichen für den Einfluss des Einsatzes eines stärkeren Harvesters vom Typ Timberjack 1470 A in den Langzeitstudien von PELTOLA (2004) gewertet werden, auf denen die Modellformeln teilweise basieren.

Der Vergleich aller sechs ausgewählten Studien mit den Ergebnissen aus dem Modell hat gezeigt, dass die während der Simulation berechneten Werte in einem Bereich liegen, der durchaus als realistisch zu bezeichnen ist. Demnach scheint die während der Referenzzeitstudie beobachtete, deutlich niedrigere Produktivität im Wesentlichen auf die Leistungsfähigkeit des Maschinenführers zurückzuführen zu sein. Der Fahrer, dessen Einfluss auf die Arbeitsleistung nach PURFÜRST (2004) entscheidend für das Endergebnis ist, hat demnach im Fall der Referenzstudie „unterdurchschnittlich“ gearbeitet zu haben. Als Orientierungswert zur Beurteilung der eigentlichen Modellleistung kann diese Zeitstudie im Hinblick auf die auf der Literaturrecherche basierenden Vergleiche demnach nicht dienen. Sie liefert aber dennoch den Nachweis dafür, dass es möglich ist, reale Bestandesstrukturen und Verhaltensweisen beobachteter Arbeitssysteme in dieser neu entwickelten Simulationsumgebung abzubilden.

10.2.2 Validierungsversuch mit dem System Forwarder

Für den Validierungsversuch mit dem Forwarder gelten dieselben Voraussetzungen wie für den Harvester. Der Forwarder, der seine Arbeit im Bestand direkt im Anschluss an den Harvester begann, wurde ebenfalls in Form einer Zeitstudie beobachtet. Dabei wurden für die Maschine folgende Werte pro Fuhre[38] erhoben:

- Fahrtroute der Maschine
- Fahrgeschwindigkeiten auf der Gasse (beladen/unbeladen), auf der Forststraße (beladen/unbeladen) und bei der Arbeitsfahrt [km/h]
- Dauer der Teilarbeitschritte pro Abschnitt [Sek]:
    - Beladen des Rungenkorbes
    - Entladen des Rungenkorbes
    - Sonstiges Kranen
    - Unterbrechungen
- Anzahl und Art der verladenen Abschnitte
- Volumenfaktor pro Sortiment

Im Modell wurden die einzelnen Stammabschnitte im Anschluss an die Ernte der Bäume durch den Harvester in drei Metern Entfernung zur Gassenmitte platziert, von wo aus sie durch den Forwarder verladen werden können. Diese Vorgehensweise entspricht auch dem beobachteten Verhalten der Maschinen im Testbestand.
Die Voreinstellungen im Frontend des Forwarders wurden an die ermittelten Größen (Fahrgeschwindigkeiten, Fahrtroute, maximales Ladevolumen) angepasst. Die Maschine hielt sich während der Simulation exakt an die vorgegebene Route und rückte sämtliche Abschnitte an die, ebenfalls an den real angelegten Poltern orientierten Plätze seitlich der Waldstraße. Dabei wurde dieselbe Arbeitsstrategie wie in der Praxis simuliert, nämlich das sortenreine Rücken. Auch der Zeitgrad wurde auf 100 festgesetzt, die unterschiedlichen Volumenfaktoren wurden den einzelnen Sortimenten entsprechend zugeordnet und Unterbrechungen wurden erneut nicht simuliert.
Bei der Auswertung wurden die Ergebnisse je Sortiment berechnet, die an dieser Stelle für die Sortimente LPZ und IS gezeigt werden (s. Tabelle 82 und Tabelle 83). Für die Sortimente CGW und Palette standen aufgrund technischer Probleme nicht alle Informationen für einen Ergebnis-Vergleich zur Verfügung. Bei beiden Losgruppen konnten gute Ergebnisse erzielt werden. So liegen beim Sortiment LPZ die Werte der RAZ nur um knapp 10 Minuten auseinander (s. Tabelle 82). Dementsprechend gibt es auch nur eine geringe Abweichung bei der Produktivität. Diese ist allerdings auch auf die leichten Unterschiede bei den Kennzahlen „Stückzahl“, „Durchschnittliches Volumen pro Abschnitt“ und „Gesamtvolumen“ zurückzuführen.

[38] Als „Fuhre“ wird in diesem Fall der Beginn der Fahrt des leeren Forwarders am Polter, das Fahren durch den Bestand bei gleichzeitigem Beladen des Rungenkorbes, das Erreichen des maximalen Ladevolumens sowie die Rückkehr und das Entladen am Polter bezeichnet.

Tabelle 82: Gegenüberstellung der Forwarder-Ergebnisse aus Zeitstudie und Simulation (Sortiment LPZ)

Beobachtete Parameter (Sortiment LPZ)	Ergebnisse Zeitstudie	Ergebnisse Simulation (Zeitgrad 100)
Stückzahl [Stk.]	451	440
Anzahl Fuhren [Stk.]	7	7
Durchschnittliches Volumen pro Abschnitt [fm]	0,206	0,210
Gesamtvolumen [fm]	89,10	92,26
Volumenfaktor	72,8	72,8
GAZ [h:min:sek]	04:19:06	03:43:37
RAZ [h:min:sek]	03:53:07	03:43:37
AZ [h:min:sek]	00:25:59	0 (es wurden keine Unterbrechungen simuliert)
Produktivität RAZ [Efm/h]	22,9	24,8

Tabelle 83: Gegenüberstellung der Forwarder-Ergebnisse aus Zeitstudie und Simulation (Sortiment IS)

Beobachtete Parameter (Sortiment IS)	Ergebnisse Zeitstudie	Ergebnisse Simulation (Zeitgrad 100)
Stückzahl [Stk.]	940	817
Anzahl Fuhren	4	4
Durchschnittliches Volumen pro Abschnitt [fm]	0,024	0,034
Gesamtvolumen [fm]	22,06	28,14
Volumenfaktor	144,8	144,8
GAZ [h:min:sek]	04:59:59	03:44:14
RAZ [h:min:sek]	04:10:09	03:44:14
AZ [h:min:sek]	00:49:50	0 (es wurden keine Unterbrechungen simuliert)
Produktivität RAZ [Efm/h]	6,7	7,5

Die zusammengefasste Simulation der Rückearbeiten für das Sortiment IS fällt ebenfalls zufrieden stellend aus, auch wenn dort die Grundvoraussetzungen etwas schlechter waren als beim Sortiment LPZ. Die Berechnung der Sortimente in HOLZERNTE brachte für dieses Sortiment besonders im Hinblick auf das durchschnittliche Volumen pro Abschnitt, das Gesamtvolumen und die Stückzahlen die größten Abweichungen. In diesem Fall gleichen sich die geringere Stückzahl und das gleichzeitig höhere durchschnittliche Volumen der einzelnen Abschnitte im Modell aber insoweit aus, dass sowohl RAZ (+/- 26 Min.) als auch Produktivität (+/- 0,8 fm/h) relativ nah beieinander liegen. Der Versuch, die Anteile des IS-Sortiments in HOLZERNTE dahingehend zu verändern, dass sich die Ausgangswerte noch weiter einander nähern, wurde ebenfalls gemacht, konnte aber keine Verbesserung herbeiführen.

Ein Vergleich der simulierten Forwarder-Leistung auf der Basis entsprechender Literatur mit anderen Zeitstudien wurde versucht, führte aber in Ermangelung geeigneter Quellen zu keinem Ergebnis. Die Formeln und Daten aus den Arbeiten von EBERHARDINGER (2006), AFFENZELLER (2005), PAUSCH (2003) und LÜTHY (1997) lassen aufgrund ihrer Beschaffenheit einen direkten Vergleich nicht zu. Speziell für den Forwarder sollten in Zukunft weitere Untersuchungen durchgeführt und in die Validierung dieses Arbeitssystems miteinfließen.

10.3 Zusammenfassung der Ergebnisse der Validierungsversuche

Bestandes- und Systemdaten

Die Übertragung einer real durchgeführten Holzerntemaßnahme in ein Simulationsmodell wurde bisher in diesem Detailgrad noch nie durchgeführt. Dem Modell waren neben den **exakten Baumparametern (Baumart, Position, BHD, Höhe, baumspezifische Sortimente)** und den **tatsächlichen Erschließungslinien und Polterplätzen** auch zahlreiche Informationen zur Abbildung des in der Praxis beobachteten **Maschinenverhaltens (Fahrgeschwindigkeiten, Fahrtrouten, Volumenfaktoren, maximales Ladevolumen)** hinterlegt. Als **„Unsicherheitsfaktor"**, der eine hundertprozentige 1:1-Abbildung der Realität im Moment noch verbietet, ist die **Berechnung der abschnittsgenauen Sortimentsdaten** im Programm HOLZERNTE zu nennen. Hier fließen zwar die einzelbaumweisen Informationen in Form von Baumanzahl, Baumart, Höhe und BHD ein, die realen Anteile der einzelnen Sortimente an der gesamten Erntemasse sind aber nach wie vor – wenn auch mit einer großen Annäherung – nur ungefähr zu erreichen. Allerdings ist absehbar, dass dieser Weg auch in Zukunft der einzig sinnvoll zu beschreitende bleiben wird, da es nicht möglich ist, jeden einzelnen Stamm eines noch stehenden Bestandes genauso aufzuteilen, wie es dann später bei der tatsächlichen Holzernte geschehen wird.
Trotz dieser Einschränkung unterstreicht die Durchführung der verschiedenen Validierungsversuche erneut das **große Einsatzpotential und die mannigfaltigen Möglichkeiten**, die das Modell dem Nutzer bietet.

Harvester

Große Abweichungen bei der Berechnung des Arbeitsaufwandes während der Referenzzeitstudie von POHL (2006) in Form einer Mehrleistung von gut 40 % im Modell, stellen ein Ergebnis dar, das auf den ersten Blick nicht zufrieden stellend sein konnte, **sich allerdings im Zuge des Vergleichs der Modellberechnungen mit sechs anderen Zeitstudien relativierte**. Dieser Vergleich hat gezeigt, dass **die Berechnungen der Produktivitäten für die einzelnen Teilarbeitsschritte im Modell durchaus realistische Werte liefern**, die Fahrerleistung während der Referenzstudie scheint eher im unterdurchschnittlichen Leistungsbereich angesiedelt zu sein. Auch wenn **für größere Stückmassen im Bereich > 1,0 Efm/Baum noch keine absolute Sicherheit bezüglich Plausibilität der Ergebnisse** gegeben werden kann, sind die angewendeten Formeln doch durchaus für weitere Simulationsläufe einsetzbar.
Festzuhalten bleibt: Der **Harvester ist im Modell in der Lage**, die **tatsächlich stattgefundene Ernte** von 382 Bäumen exakt **in derselben Reihenfolge** und **unter nahezu gleichen Bedingungen wie in der Praxis auszuführen**. **Dabei werden realistische Leistungskennzahlen berechnet**.

Forwarder

Eine **fuhrengenaue und sortenreine oder –gemischte Darstellung realer Rückeprozesse** eines Forwarders ist in dieser Form bislang nicht erreicht worden. Erstmals kann ein Modell die tatsächlichen Arbeitsprozesse eines Forwarders während der Rückung mit einer **sehr hoch auflösenden Detailschärfe** darstellen. Auch der **Einbezug von Volumenfaktoren** und an bestimmten Stellen positionierten **Polterplätzen** ist erfolgreich verlaufen.
Die gewonnenen Ergebnisse weisen zwar gewisse **Abweichungen** auf, insgesamt bewegen sich diese aber **im Rahmen der** zuvor genannten **tolerierbaren Grenzen**. Die eingesetzten **Produktivitätsformeln** lassen sich also auf dieses Versuchsbeispiel anwenden, **müssen ihre generelle Brauchbarkeit aber noch in weiteren Versuchen unter Beweis stellen**.

Motormanuelle Holzernte, Schlepper und Pferd

Wie eingangs bereits erwähnt, wurde eine Validierung der tarifbasierten Formeln, mit denen diese Arbeitssysteme im Modell rechnen, nicht als notwendig erachtet. Die **Tarife** sollten als Ergebnis jahrzehntelanger Forschungs- und Entwicklungsarbeiten im Rahmen bestimmter Grenzen **eine stabile Kalkulationsgrundlage** für den Einsatz in einem Holzerntemodell darstellen.

Die hier durchgeführten Versuche können nur ein **erster Schritt in Richtung einer tief greifenden Validierung** sein. **Weitere Untersuchungen müssen stattfinden**, um die Aussagen, die durch die Simulation gewonnen werden mit zusätzlichen realen Kennzahlen zu belegen. Bei der Modellierung von Systemen wird oft die Validierung bzw. der damit verbundene Arbeitsaufwand unterschätzt. Zusätzlich erweist sich die Forstwirtschaft mit ihren heterogenen Gegebenheiten in der Darstellung als besonders schwierig. Sollten in Zukunft auch noch weitere Systemeigenschaften wie der Einfluss dreidimensionaler Strukturen oder die Auswirkungen von Mischbeständen mit hohem Laubholzanteil auf die Holzernte in das Modell aufgenommen werden, wird sich der Umfang der Validierungsarbeiten weiter vergrößern. Diese Aufgabe erfordert nach Auffassung des Autors weitere intensive, wissenschaftliche Studien.

11 Kritische Würdigung der Arbeit und Ausblick

Die Besonderheit der hier vorliegenden Arbeit besteht darin, dass sie eine Art „Fortsetzung“ des 2003 von BRUCHNER entwickelten Forschungsansatzes darstellt. BRUCHNER begann mit der Umsetzung der Idee, die bisher in zahlreichen, nicht forstlichen Industriebereichen eingesetzte Simulationssoftware AutoMod bei der Modellierung forsttechnischer Prozesse in der Holzproduktion einzusetzen. Diese Idee wurde von ihr in Form eines facettenreichen, aber in der forstlichen Praxis noch nicht anwendbaren Basismodells umgesetzt, das sie für einen 1 ha großen, mittelalten Fichtenreinbestand mit schematisch angelegtem Rückegassensystem unter Einbeziehung der forstlichen Arbeitssysteme Harvester und Forwarder entwickelte.
BRUCHNER gelang es mit diesem Prototyp, das bisher in der Forstwirtschaft in dieser Form nicht genutzte Hilfsmittel Simulation auf Ebene der Einzelbaumbetrachtung, also auf einem sehr hoch auflösenden Niveau einzusetzen und dadurch erste Ansätze einer tatsächlichen Nutzbarkeit der Software AutoMod zur Darstellung und Kalkulation forstlicher Strukturen und planungsrelevanter Systemkennzahlen nachzuweisen.
Ihre Arbeit konnte aufgrund des hohen Forschungsaufwandes von Beginn an nur als erster Schritt in die richtige Richtung bewertet werden, ein Schritt allerdings, der Grundvoraussetzung für die an dieser Stelle zu diskutierende Arbeit gewesen ist.
Auf den folgenden Seiten soll zuerst ein Überblick über die im Vergleich zu BRUCHNERS Arbeit erzielten Fortschritte in der Entwicklung des Holzerntemodells gegeben werden. Anschließend werden sowohl die angewandte Methodik, als auch die Einsatzfähigkeit der Software in Forschung, Praxis und Lehre kritisch untersucht, bevor sich das letzte Kapitel mit noch bestehenden Schwachstellen bzw. mit dem daraus resultierenden, zukünftigen Entwicklungsbedarf befasst.

11.1 Weiterentwicklung des Basismodells von BRUCHNER

In Kapitel 2 dieser Arbeit wurden zahlreiche Zielvorgaben für die Weiterentwicklung des von BRUCHNER erstellten Basismodells formuliert. Tabelle 84 gibt einen Überblick über die Umsetzung der genannten Ziele und vergleicht die aktuellen Eigenschaften des Modells mit denen von BRUCHNERS Basismodell. Es wird deutlich, dass es gelungen ist, sämtliche Zielsetzungen in das neu entwickelte Modell zu integrieren.
HEMM (2002) untersuchte zahlreiche softwarebasierte Planungsinstrumente aus sieben verschiedenen Ländern und stellte dabei fest, dass eine Simulation in der Form, wie BRUCHNER sie dann entwickelte, bisher nicht existiert. Das im Rahmen der hier vorliegenden Arbeit entwickelte Modell stellt nun einen weiteren, umfassenden Schritt in Richtung des übergeordneten Forschungszieles dar und ist mit seinem hoch auflösenden Detailgrad und seiner Realitätsnähe bis heute weltweit der erste Prototyp. Die Bedeutung wird durch das große Interesse an dieser Arbeit unterstrichen, das dem Autor bei der Vorstellung seiner Forschungsarbeiten auf zahlreichen nationalen und internationalen wissenschaftlichen Kongressen entgegen gebracht wurde.

Tabelle 84: Vergleich des von BRUCHNER 2004 entwickelten Basismodells mit den Eigenschaften des aktuell vorliegenden Modells (X = Eigenschaft im Modell vorhanden, --- = Eigenschaft nicht im Modell vorhanden)

Modelleigenschaften	Umsetzung im Basismodell von BRUCHNER (2004)	Umsetzung im aktuellen Modell
Eigenschaften der Darstellung der Bestandesfläche, der Erschließungssysteme und der Polter		
Modellierung von quadratischen Bestandesflächen mit einer maximalen Größe von 1 ha	X	X
Modellierung von Bestandesflächen mit einer Größe > 1 ha und frei definierbarem Grenzlinien-Verlauf	---	X
Darstellung von schematischen Rückegassensystemen, z.B. mit festen Abständen von 20 m zwischen den einzelnen Gassen	X	X
Darstellung von real existierenden Erschließungssystemen (Einmessung der Systemkoordinaten mit GPS)	---	X
Freie Variation der real existierenden Erschließungssysteme durch Hinzufügen oder Entfernen einzelner Gassen oder Gassenabschnitte	---	X
Darstellung einer frei wählbaren Anzahl von Poltern	X	X
Option zur Aktivierung bzw. Deaktivierung einzelner Polter im Modell	---	X
Eigenschaften der Darstellung des aufstockenden und des zu erntenden Bestandes		
Implementierung von den realen Gegebenheiten angepassten Bestandesinformationen (Position, Baumart, BHD, Höhe), die mit Hilfe des Waldwachstumssimulators SILVA generiert wurden	X	X
Verteilung von Bestandesinformationen aus SILVA über eine beliebig große Fläche (> 1 ha)	---	X
Auswahl der zu erntenden Bäume als prozentualer Anteil aller insgesamt aufstockenden Bäume ohne Berücksichtigung waldbaulicher Prinzipien	X	X
Auswahl der Erntebäume durch Simulation einer nach waldbaulichen Prinzipien durchgeführten Auszeichnung in SILVA und Übertragung dieser Informationen in das Modell	---	X
Sortimentierung durch einfache Aufteilung in Abschnitte gleicher Länge der als zylindrisch geformte, vollholzige Stämme definierten Erntebäume; Die produzierten Abschnitte besitzen daher alle dieselbe Länge und dasselbe Volumen	X	---
Frei definierbare Sortimentierung jedes einzelnen Baumes nach den Prinzipien der Handelsklassensortierung (HKS) durch Einsatz der Kalkulationssoftware HOLZERNTE; Die produzierten Abschnitte sind daher alle individuell in Qualität, Durchmesser, Länge und Volumen verschieden, die Abholzigkeit jedes Baumes wird voll berücksichtigt	---	X
Möglichkeit zur Darstellung von Bäumen, die auf potenziell als Rückegassen definierten Flächenabschnitten positioniert sind	---	X
Darstellung der Alterung eines ausgewählten Bestandes vom Status Quo bis zur Endnutzung mit Hilfe der SILVA-Software bei gleichzeitiger Anpassung der Aushaltung der einzelnen Sortimente an die neuen Dimensionen der zu erntenden Bäume unter Einsatz der Software HOLZERNTE	---	X
Eigenschaften der Darstellung der Arbeitssysteme		
Modellierung der Arbeitssysteme Harvester und Forwarder	X	X
Modellierung der Arbeitssysteme Motormanuelle Holzernte, Schlepper und Pferd	---	X
Auswahlmöglichkeit bestimmter Systemkombinationen	---	X

Implementierung spezieller Produktivitätsformeln (keine vereinfachten Dreiecksfunktionen!) für die Berechnung der Dauer einzelner Teilarbeitsprozesse für das System Harvester	X	X
Implementierung spezieller Produktivitätsformeln (keine vereinfachten Dreiecksfunktionen!) für die Berechnung der Dauer einzelner Teilarbeitsprozesse für das System Forwarder	---	X
Berücksichtigung des Einflusses der Fähigkeiten des Maschinenführers auf die Systemleistung durch Implementierung eines Zeitgrades	---	X
Frei wählbare Fahrtroute für die Systeme Harvester und Forwarder	---	X
Einbeziehung von Störzeiten für die Systeme Harvester und Forwarder während der Simulation	X	X
Möglichkeit zur minutengenauen Definition der Unterbrechungsdauer sowie der Unterbrechungsart bei gleichzeitiger Festlegung eines prozentualen Anteiles der Reinen Arbeitszeit (RAZ) an der Gesamtarbeitszeit (GAZ) für die Systeme Harvester und Forwarder	---	X
Möglichkeit zur optionalen Darstellung eines Gassenaufhiebs inkl. Nachweisbarkeit der Auswirkungen dieser Operation auf die Leistung des Systems Harvester	---	X
Darstellung der Auswirkung von Veränderungen des Erschließungssystems auf die Leistungsfähigkeit der Systeme Harvester und Forwarder	---	X
Möglichkeit zur optionalen Darstellung der Alterung eines Bestandes inkl. Nachweisbarkeit der Auswirkungen dieses Prozesses auf die Leistung der simulierten Arbeitssysteme	---	X
Berücksichtigung unterschiedlicher Fahrgeschwindigkeiten für die Systeme Harvester und Forwarder	X	X
Implementierung so genannter „Volumenfaktoren“ zur Darstellung der unterschiedlichen Auslastung der maximalen Ladekapazität in Abhängigkeit der Dimensionen unterschiedlicher Sortimente in das System Forwarder	---	X
Implementierung so genannter „Sortengruppen“ zur Darstellung sortenreiner oder sortengemischter Rücke-Operationen für das System Forwarder	---	X
Frei wählbare Einstellung der Zangenkapazität und der Kranreichweite beim System Forwarder	---	X
Implementierung einer Maschinenkostenkalkulation für die Systeme Harvester, Forwarder und Schlepper	---	X
Einbau einer Maschinendatenbank, in der vorgefertigte Einstellungen zu bestimmten Maschinentypen definiert und durch Knopfdruck abgerufen werden können	---	X
Einbau eines Schichtmodells zur Definition bestimmter Schichtlängen und Pausenzeiten	---	X
Eigenschaften der Ergebnis-Präsentation		
Darstellung der Ergebnisse nach Baumart, Sortimenten und Sortengruppen für die Arbeitssysteme	---	X
Eigenschaften der graphischen Darstellung der Simulation		
Einbau detailgetreuer Maschinen-Abbildungen in die graphische Darstellung der Simulation	---	X
Möglichkeit zur Auswahl der Anzeige aller Bäume des aufstockenden Bestandes oder nur der für die Ernte ausgewählten Individuen	---	X
Darstellung der realen Proportionen (Durchmesser, Höhe) der einzelnen Bäume und Abschnitte	---	X
Farbliche Unterscheidung der verschiedenen Sortimentsabschnitte	---	X
Anzeige des tatsächlichen Inhaltes der einzelnen Holzpolter während der Simulation	---	X

11.2 Kritische Würdigung der methodischen Vorgehensweise

Ausgangspunkt für den Beginn dieser wissenschaftlichen Arbeit war das Basismodell von BRUCHNER (2004). Ihr war mit diesem Modell erstmals der Einsatz einer industriell genutzten Software zur Modellierung und Simulation forstlicher Strukturen und Arbeitsprozesse gelungen. Damit hatte sie den Nachweise geführt, dass es technisch möglich ist, mit Hilfe von Simulation systemspezifische Kennzahlen forstlicher Produktionsprozesse berechnen zu lassen, die im Anschluss als Unterstützung forstlicher Entscheidungsträger bei der Planung von Holzernteoperationen dienen können.

In ihrem Basismodell hatte BRUCHNER auch bereits die beiden Arbeitssysteme Harvester und Forwarder in zwei unterschiedlichen Beständen simuliert. Allerdings handelte es sich um zwei nur 1 ha große, mit quadratischer Grundfläche und einem schematisch vereinfachten Rückegassensystem ausgestattete Bestände. Das übergeordnete Ziel, dass auch schon BRUCHNER als Leitlinie diente, ist aber als „Abbildung real existierender forstlicher Strukturen sowie Modellierung und Simulation einer Auswahl in der forstlichen Praxis eingesetzter Arbeitssysteme“ definiert.

BRUCHNER hatte sich bei ihrem 1 ha großen Basismodell an einem real existierenden, mittelalten Fichtenreinbestand aus Schwaben orientiert, allerdings stellt diese Form von Bestand in deutschen Wäldern sowohl von seiner Größe als auch von seiner Flächenform und seiner Erschließungssituation eher die Ausnahme dar. Hinzu kommt, dass für die beiden simulierten Arbeitssysteme Harvester und Forwarder in Ermangelung besserer Datensätze Abstriche bei der Qualität der eingesetzten Formeln zur Berechnung des zeitlichen Aufwandes einzelner Holzernte- und Rückeaktionen gemacht werden mussten. Abstraktionen wie die Darstellung der Bäume als vollholzige Zylinder, die Definition der Sortimente als vollkommen gleiche Abschnitte, das Gesamtbaumvolumen als Einflussfaktor auf die Produktivität des Harvesters sowie der Einsatz einer Dreiecksfunktion zur Berechnung des Zeitaufwandes beim Be- und Entladen des Forwarders waren zum damaligen Zeitpunkt notwendig, können aber langfristig betrachtet keinesfalls die in Kapitel 2 formulierte, übergeordnete Zielvorgabe erfüllen.

Zusätzlich wurde zu Beginn der hier präsentierten Arbeit eine Liste mit weiteren Verbesserungsvorschlägen hinsichtlich der Zielformulierung erstellt, deren Inhalte dann zu einem großen Teil in die Definition der Ziele (s. Kapitel 2) einging. Diese Liste enthält allerdings noch weitere Punkte, die Entwicklungsbedarf besitzen, allerdings konnten aus Zeit- und Kostengründen nicht alle Vorschläge direkt im Modell umgesetzt werden. Diese noch nicht berücksichtigten Punkte werden aber im Ausblick auf den weiteren Forschungsbedarf speziell diskutiert.

11.2.1 Darstellung real existierender forstlicher Strukturen und Arbeitssysteme

Das aktuell vorliegende Modell besitzt eine Vielzahl von Variationsmöglichkeiten bei der Darstellung forstlicher Strukturen und Arbeitssysteme. Als Maßgabe für die Entwicklung des Modells eines Testbestandes aus dem Forstbetrieb Paderborn stand der Wunsch, nicht zwangsläufig an die Darstellung nur einer bestimmten Bestandesfläche, eines bestimmten Erschließungssystems und einer bestimmten Bestandeszusammensetzung und Bestandesstruktur gebunden zu sein. Der Testbestand sollte bei seiner Abbildung im Modell zwar so präzise wie möglich den tatsächlichen Gegebenheiten angepasst werden, gleichzeitig sollte das Modell aber so variabel entwickelt werden, dass eine problemlose Änderung sämtlicher Flächenbegrenzungen, Erschließungslinien, Bestandesbilder, Eingriffsarten und Aushaltungsoptionen ohne Weiteres möglich ist.

Abbildung real existierender Bestandesflächen

Der Verlauf der Grenzlinien des Testbestandes aus Paderborn unterscheidet sich deutlich von der quadratischen Form des Basismodells von BRUCHNER. Um die tatsächliche Bestandesfläche dennoch in das Modell zu übernehmen, wurden ihre Eckkoordinaten mit Hilfe eines GIS aus einem digitalen Geländemodell des Landes Nordrhein-Westfalen extrahiert und nach Umrechnung der Gauss-Krüger-Koordinaten auf ein modellinternes Koordinatensystem übertragen. Diese Vorgehensweise ermöglichte eine 1:1 Darstellung der realen Verhältnisse in das Modell.
Der Nutzer ist nun also in der Lage, bei entsprechender Verfügbarkeit eines digitalen Geländemodells oder zumindest bei Verfügbarkeit der Eckkoordinaten einer zu modellierenden Fläche unter Zuhilfenahme eines GIS jedwede**, in der Wirklichkeit existierende Bestandesfläche in AutoMod abzubilden**. Natürlich ist **auch eine Neueinteilung bestimmter Flächen bei Wiederaufforstungen oder Bestandesumwandlungen durchführbar**.

Abbildung real existierender Erschließungssysteme

Ist die Grundfläche des Bestandes in das Modell implementiert, kann der Nutzer mit der Definition des Erschließungssystems beginnen. Hier stehen ihm mehrere Optionen zur Verfügung:
Zuerst einmal ist es ihm möglich, das real existierende Wege- und Gassennetz im Modell abzubilden. Voraussetzung dafür ist die Verfügbarkeit der Start- und Endkoordinaten jeder Forststraße und jeder Rückegasse, die die Bestandesfläche durchlaufen. Für das Modell des Testbestandes wurden unter Einsatz eines Theodoliten auf der Basis zuvor definierter, mit einem GPS eingemessener Festpunkte als Orientierung im Raum die Koordinaten für das gesamte Erschließungssystem ermittelt. Nach Transformation dieser Werte wurde das tatsächlich im Original-Bestand vorliegende Gassennetz im Modell der Bestandesgrundfläche hinzugefügt. Bei entsprechender Verfügbarkeit der notwendigen Koordinaten **kann der Nutzer des Modells also alle in der Wirklichkeit vorhandenen Erschließungssysteme problemlos im Modell abbilden**.

Liegen diese Informationen aber nicht in ausreichender Qualität vor, besteht trotzdem die Option, in einem GIS auf der realen Bestandesfläche ein **idealisiertes bzw. nach den Wünschen und Vorstellungen des Nutzers entwickeltes Gassensystem** zu definieren und **dem Modell hinzuzufügen**.
Zusätzlich **können jederzeit Gassen** bereits im Modell integrierter Erschließungssysteme **entnommen, in ihrem Verlauf verändert oder komplett ergänzt werden**. Dem Nutzer stehen damit **alle erdenklichen Variationsmöglichkeiten bei der Gestaltung der Erschließungslinien** zur Verfügung.

Abbildung real existierender Polterplätze

Ist dem Nutzer der abgebildete Bestand aus der Realität bekannt, kann er die **Polterplätze**, an die im Anschluss an die Ernte das Holz gebracht werden soll, **genau an den Stellen im Modell platzieren, an denen sie sich auch in der Realität befinden**. Kennt der Nutzer die tatsächlichen Gegebenheiten allerdings nicht, so kann er **entscheiden, wo die Polter strategisch am besten positioniert werden sollen**. Außerdem ist er jederzeit im Stande, bereits definierte **Polterplätze zu verschieben bzw. diese zu aktivieren oder deaktivieren**. Ist beispielsweise ein Polterplatz im wirklichen Bestand schon ausgelastet oder aus Gründen mangelnder Belastbarkeit des Bodens nicht nutzbar, kann er per Knopfdruck als nicht verfügbar ausgewiesen werden.

Abbildung real existierender Bestände inkl. der entsprechenden Sortimentsabschnitte

Schon im Basismodell von BRUCHNER wurde zur Gewinnung der benötigten, einzelbaumweisen Informationen die Software SILVA erfolgreich eingesetzt. Dies war möglich, da SILVA vorzugsweise bis zu 1 ha große Bestände generiert und das Basismodell ebenfalls eine Größe von 1 ha besaß. Die Bestandesfläche konnte also komplett mit Bäumen „bestockt“ werden.
Der ausgewählte Testbestand aus dem Forstbetrieb Paderborn überschreitet aber mit einer Größe von 10,8 ha die bisherigen Dimensionen deutlich. Es wurde also notwendig, eine Methode zu entwickeln, die es erlaubt, die in SILVA erzeugten Einzelbauminformationen, die in ihren Werten (Baumartenanteile, Alter, Durchmesser, Höhe, Bestockungsgrad, Eingriffsart) den realen Gegebenheiten sehr nahe kommen, für die Abbildung großflächigerer Bestände einzusetzen.
Der daraufhin notwendige Wechsel von der Software „MS Excel“, die bis dahin für die Datenverwaltung des Modells genutzt wurde, hin zur Software „MS Access“, ermöglichte durch Definition spezieller Abfrage-Algorithmen eine „Klonung“ der jeweils knapp 1 ha großen Ausgangs-Quadranten bei gleichzeitiger Verteilung über die gesamte Bestandesfläche. Auf diese Weise kann **der Nutzer nun durch Variation der entsprechenden Abfragen alle Formen und Größen von Bestandesflächen mit Bäumen „bestocken“**.

Als weiterer Punkt der Weiterentwicklung des Basismodells ist die Auswahl der zu erntenden Bäume zu nennen, die bei BRUCHNER noch in Form eines prozentualen Anteils der Gesamtanzahl aller Bäume des aufstockenden Bestandes vollzogen wird. Im neuen Modell werden nun aber direkt die Informationen über die Entnahme, die der Waldwachstumssimulator SILVA im Zuge einer Eingriffssimulation jedem einzelnen Baum des erzeugten Bestandes zuordnet, berücksichtigt. Dadurch **kann der Nutzer in SILVA jede Form eines nach waldbaulichen Kriterien begründeten Eingriffs simulieren und diese Informationen im Anschluss in das AutoMod-Modell überführen**. Theoretisch besteht auch die Möglichkeit, in AutoMod selbst einzelne Bäume für eine Entnahme zu markieren. Der damit verbundene Zeitaufwand wäre aber extrem hoch.

Sind die Bäume auf der Fläche verteilt und nach waldbaulichen Prinzipien für die Simulation eines Holzernteeingriffs vorbereitet, benötigt man im nächsten Schritt Informationen über die einzelnen Sortimentsabschnitte, die während der Ernte durch Harvester oder Waldarbeiter produziert werden. BRUCHNER löste dieses Problem dadurch, dass sie die Erntebäume als vollholzige, zylinderförmige Stämme definierte, die dann in gleichlange, gleichvoluminierte Abschnitte aufgeteilt wurden. Wie bereits erwähnt, war dieses Vorgehen zum damaligen Zeitpunkt sicherlich zu rechtfertigen, es erfüllt in seiner Genauigkeit aber nicht den Anspruch, „reale forstliche Verhältnisse“ zu simulieren.
Als völlig neuer Lösungsansatz gelang es innerhalb dieser Forschungsarbeit, die Kalkulationssoftware HOLZERNTE der FVA Baden-Württemberg in den Prozess der Datengewinnung zu integrieren. Die Einzelbauminformationen aus SILVA zu Baumart, BHD und Höhe können nun komplett in HOLZERNTE eingelesen und dort bearbeitet werden. **Für den Nutzer bedeutet dies eine uneingeschränkte Variabilität bei der Aushaltung der Erntebäume**. Er **kann tatsächliche Einflussgrößen wie geringe Qualität oder dringend benötigte Sortimente**, die ihm über den entsprechenden Bestand bekannt sind, in seine Entscheidungen **miteinfließen lassen**.
Bei der Simulation der Holzernte im Modell können nun tatsächliche Informationen über Qualität, Länge, Durchmesser, Abholzigkeit sowie Volumen mit und ohne Rinde jedes einzelnen Stammabschnitts berücksichtigt werden und verbessern dadurch die Qualität der Ergebnisse enorm.

Im Zusammenhang mit den Ausführungen zur Darstellung der real existierenden Erschließungssysteme wurde schon darauf hingewiesen, dass es im aktuellen Modell möglich ist, einzelne Rückegassen einem bestehenden Gassensystem hinzuzufügen. Darüber hinaus **kann der Nutzer** nun auch selbst **entscheiden, ob diejenigen Bäume, die sich naturgemäß noch im Bereich der neu anzulegenden Gasse befinden, angezeigt und im Verlauf der Holzerntesimulation als „Aufhieb“ ebenfalls gefällt werden sollen** oder nicht. Auch diese neue Modelleigenschaft erhöht den „Realitätsgrad“ der dargestellten Prozesse deutlich. Es lassen sich z.B. auch nur die Dauer und die Kosten des Aufhiebs einer neuen Gasse durch Waldarbeiter als Vorbereitung eines Harvestereinsatzes berechnen.

Interessiert sich der **Nutzer** für die Entwicklung eines Bestandes z.B. im Hinblick auf zukünftige Pflegemaßnahmen oder langfristig erkennbare, spezielle Nachfragewünsche von Seiten der Holzindustrie, **kann** er nun **die in SILVA über mehrere Jahrzehnte in die Zukunft erzeugten Informationen über „seinen" Bestand in Kombination mit den gewünschten bzw. zu erwartenden Veränderungen bei der Aushaltung in HOLZERNTE kombinieren und in das AutoMod-Modell einfließen lassen**. So kann er heute schon einen Holzernteeinsatz in fünf oder zehn Jahren kalkulieren.

Abbildung real existierender forstlicher Arbeitssysteme

BRUCHNER simulierte in ihrem Basismodell bereits die Arbeitssysteme Harvester und Forwarder. Im Rahmen der Weiterentwicklung **kommen nun noch die drei Systeme Motormanuelle Holzernte, Schlepper und Pferd hinzu**. Drei neue Arbeitssysteme bedeuten eine Vielzahl an neuen Variationsmöglichkeiten bei der Versuchsanordnung einzelner Simulationsläufe. Der Nutzer kann nun beispielsweise den Vergleich von Dauer, Leistung und Kosten einer Holzernte durch den Harvester oder die Waldarbeiter mit anschließender Rückung durch den Forwarder oder den Schlepper ziehen, wobei sich der Einfluss des zuvor definierten Erschließungssystems (mit Ausnahme des Arbeitssystems Schlepper), der Eingriffsart und Eingriffsstärke, der vorgenommenen Aushaltung sowie der individuell festgelegten Maschinenparameter im berechneten Endergebnis widerspiegelt.
Alle drei neu hinzugekommenen Systeme basieren auf über lange Zeit gewachsenen und daher als zuverlässig eingestuften **Tarifwerken**, die aber auch gewisse Ungenauigkeiten bei der Simulation der jeweiligen Arbeitssysteme verursachen. So **sind in sämtlichen Tarifwerken die Zeiten für Pausen und sonstige Unterbrechungen schon in die angegebene Gesamtdauer eines Prozesses integriert**, was die Flexibilität der Handhabung dieser Systeme etwas hemmt. **Ebenso sind sämtliche Fahr- bzw. Laufzeiten Bestandteil der in den Tarifen als Normalleistung vorgegebenen Arbeitszeiten**, was eine streckenbezogene Berechnung dieser Werte unmöglich werden lässt. Eine genaue Festlegung der Fahrtroute ist daher für alle drei Systeme nicht notwendig. Wünschenswert wären Produktivitätsformeln in der Art, wie sie bei den Systemen Harvester und Forwarder bei der Berechnung des zeitlichen Aufwandes einzelner Teilarbeitsschritte zum Einsatz kommen, doch diese Formeln existieren bis zum heutigen Zeitpunkt noch nicht. **Die Tarife liefern dagegen eine gut nutzbare Datenbasis, auch wenn sie an manchen Stellen das Modell im Bereich der Kalkulationen einschränken**.

Speziell bei der Entwicklung der mit einzelnen Produktivitätsformeln rechnenden Systeme Harvester und Forwarder wurden gegenüber dem Basismodell von BRUCHNER zahlreiche Neuerungen eingeführt.
Für den **Harvester** konnten auf der Grundlage von umfangreichem Material **aus finnischen Langzeitstudien Formeln zur Berechnung des Zeitaufwandes für die Arbeitsabschnitte „Positionieren des Aggregats", „Fällschnitt", „Fällen und Vorliefern", „Vorschub des Stammes im Aggregat" und „Trennschnitt"** für den Einsatz im Modell **entwickelt werden**. Dies war aus Sicht des Autors unumgänglich, da sich die von BRUCHNER verwendeten Formeln zum einen nur auf das

Gesamtvolumen der zu erntenden Bäume und nicht auf die produzierten Abschnitte bezogen, zum anderen, weil nur Formeln für das „Positionieren“ und das „Fällen und Aufarbeiten“ existierten. Mit dieser Veränderung können **präzisere Rechenwege** als zuvor genutzt werden, der **Einfluss jedes einzelnen Abschnittes auf die Leistung** des Harvesters **erhöht zusätzlich die Genauigkeit der Ergebnisse**.
Für den **Forwarder** konnten ebenfalls neue **Formeln für die Prozesse „Beladen“ und „Entladen“** konstruiert bzw. aus der Literatur übernommen und in das Modell integriert werden, was ebenfalls als notwendig erachtet worden war, da das Basismodell lediglich mit Dreiecksfunktionen arbeitete, die ebenfalls dem übergeordneten Ziel der Abbildung realer Vorgänge nicht in ausreichendem Maß gerecht werden konnten.
Des Weiteren ist es dem Nutzer nun möglich, **für beide Arbeitssysteme** eine **exakte Fahrtroute** durch den Bestand vorzugeben, **Störzeiten** in Art und Dauer zu **definieren**, **Schichten und Pausenzeiten festzulegen** sowie eine in der Praxis eingesetzte **Maschinenkostenkalkulation** innerhalb des Modells auszufüllen und so einen individuellen Kostensatz für die weiteren Berechnungen zu ermitteln (dies gilt auch für das System Schlepper). Die Einstellung eigener Fahrtrouten unterstützt zusätzlich die **Darstellung des Einflusses neu hinzugefügter oder entfernter Rückegassen**, da sich veränderte Fahrtwege direkt auf die Dauer und die Produktivität der Systeme auswirken. Der für den **Harvester bzw.** die **Waldarbeiter** durch Einbau neuer Gassen hinzukommende **Aufhieb lässt sich** im neuen Modell ebenfalls **detailgetreu simulieren**. Alle genannten Erweiterungen tragen uneingeschränkt dazu bei, die Darstellung tatsächlicher Operationen in vollem Umfang umzusetzen.

Weitere **Ergänzungen** gibt es **beim System Forwarder**: Neben der **Neu-Definition der Fahrgeschwindigkeiten** und Aufstockung ihrer Anzahl von zwei auf fünf, können nun **erstmals** für die **Maschinenparameter „Kranreichweite“ und „Zangenkapazität“** frei wählbare Werte festgelegt werden.
Die Hinzunahme des „**Volumenfaktors**“ zur Darstellung der unterschiedlichen Ausprägung des Ladezustands in Abhängigkeit des geladenen Sortiments, und die Einflussnahme auf die Rückstrategie durch die Bildung so genannter „**Sortengruppen**“ führen ebenfalls zu einer realitätsnäheren Simulation der Rückung durch den Forwarder als dies bisher der Fall war.

Eine ganz entscheidende Verbesserung liegt in der nun in das Modell integrierten Option, die Leistungsfähigkeit der jeweiligen Maschinen- bzw. des Pferdeführers in Form eines **Zeitgrades** individuell einzustellen. Der **Nutzer kann** dadurch beispielsweise **einen erfahrenen oder einen noch am Anfang seiner Tätigkeit stehenden Arbeiter simulieren**.

Die Auswirkungen einer **Bestandesalterung** auf die Auswahl des einzusetzenden Maschinensystems sowie auf die Zusammensetzung der Sortimente und damit auf die zukünftig zu erwartenden Kosten und Holzmengen lassen sich nun **über mehrere Jahrzehnte hinweg** aufzeigen. Mit Hilfe von entsprechend veränderten Bestandesdaten aus SILVA und HOLZERNTE ist der Blick in die Zukunft ohne weiteres ausführbar.

Wer nicht jedes System als einzelne Simulation betrachten möchte, hat verschiedene, forstlich sinnvolle **Kombinationsmöglichkeiten zur Auswahl**. Diese Option erlaubt es dem Nutzer außerdem, Zusammenhänge und Abhängigkeiten (Schichtdauer und Arbeitsbeginn kombinierter Systeme, Auswirkungen von Unterbrechungen auf andere Systeme) der Arbeitssysteme untereinander zu beobachten und im Ergebnis zu beurteilen.

Schließlich wurde für die einfachere Handhabung der einstellbaren Maschinenparameter eine **Maschinendatenbank** hinterlegt, die es dem Nutzer erleichtert, verschiedene Einstellungen für unterschiedliche Maschinentypen per Knopfdruck in das Modell einzulesen.

Darstellung der Ergebnisse

Der ohnehin schon sehr umfangreichen und detaillierten Präsentation der Simulationsergebnisse in MS Excel wurde eine **weitere Unterteilung der Werte je nach Baumart, Sortimenten und Sortengruppen** hinzugefügt. Für den Nutzer sind die Ergebnisse nun noch übersichtlicher gegliedert, was ihm den Vergleich unterschiedlicher Arbeitssysteme bzw. deren Kombinationen erleichtert.

Graphische Darstellung der Simulation

Die graphische Präsentation der Simulation, die für den Nutzer in erster Linie eine Kontrollfunktion besitzt, wurde im Vergleich zum Basismodell weiter entwickelt.
Neue Graphiken für alle fünf Arbeitssysteme wurden gezeichnet, die **Einzelbäume** sind nun in ihren **Proportionen (Durchmesser, Höhe) realitätsgetreu dargestellt**, die einzelnen **Abschnitte** sind je nach Sortiment **farblich unterschiedlich markiert** und **an den Poltern** informieren ständig aktualisierte **Anzeigen** über die dort lagernden Holzmengen.
Um die Rechenzeiten bei Simulation mit graphischer Unterstützung, die je nach Wunsch auch abgeschaltet werden kann, nicht unnötig zu verlängern, kann sich der Nutzer **entweder alle auf der Fläche stockenden Bäume oder nur diejenigen, die zur Ernte anstehen, anzeigen** lassen. Je weniger Bäume graphisch animiert werden müssen, umso geringer fällt die Rechenzeit des PC aus.

Es zeigt sich, dass im Vergleich zum Basismodell von BRUCHNER in allen Bereichen des Modells (Bestandesfläche, Erschließungssystem, Baumkollektive, Sortimente, Arbeitssysteme, graphische Darstellung, Benutzerfreundlichkeit) aufwendige Weiterentwicklungen stattgefunden haben. Dem übergeordneten Ziel der „Abbildung real existierender forstlicher Strukturen und der Simulation der Realität entsprechender Arbeitssysteme und ihrer Verhaltensweisen“ ist man somit ein sehr großes Stück näher gekommen. Aufgrund noch nicht vollständig ausreichender Datensätze und des hohen Kostenaufwandes konnten manche Entwicklungen, die schließlich eine noch größere Annäherung an die übergeordnete Zielvorgabe bedeuten würden, noch nicht umgesetzt werden. Um welche es sich dabei handelt, wird im weiteren Verlauf näher erklärt.

Festzuhalten bleibt, dass alle Teilziele, die man sich zu Beginn der Arbeit gesetzt hatte, auch tatsächlich erreicht wurden. Es ist gelungen, einen tatsächlich existierenden Bestand im Modell abzubilden. Dieser Bestand konnte aufgrund fehlender Informationen nicht einzelbaumweise rekonstruiert werden, die wichtigsten Kenngrößen (Baumartenanteile, Alter, Durchmesser, Höhe, Bestockungsgrad, Eingriffsart) entsprechen aber auch im Modell der Realität.
Weiter ist es möglich, insgesamt den Einsatz von fünf Arbeitssystemen alleine oder in verschiedenen Kombinationen zu simulieren und zahlreiche Ergebnisgrößen auf der Basis einzelbaumweiser Berechnungen zu erhalten.
Das Modell dient dabei nicht alleine als Umgebung für die Darstellung und Simulation des einen ausgewählten Testbestandes, sondern kann je nach Wunsch und nach Verfügbarkeit der notwendigen Daten völlig frei durch den Nutzer verändert werden. Jedes Bestandesszenario ist darstellbar, auch könnten weitere Arbeitssysteme in das Modell implementiert werden. Der Phantasie sind an dieser Stelle nur die Grenzen des Vorhandenseins ausreichender Daten entgegen gesetzt.

11.2.2 Verifizierung und Validierung

Die **Verifizierung des Modells verlief problemlos**. An einigen Stellen mussten zwar noch verfahrenstechnische Details in der Programmierung, beispielsweise bei der Einstellung der jeweiligen Fahrtroute von Harvester und Forwarder, verbessert werden, insgesamt funktioniert die Software aber bei der Darstellung der forstlichen Strukturen und der Arbeitssysteme zum heutigen Zeitpunkt ohne Einschränkung.

Etwas anders verhält es sich bei der **Validierung** bzw. bei dem ersten Versuch einer Validierung, den POHL (2006) unternommen hat. Als klarer Erfolg kann zuerst die Tatsache bezeichnet werden, dass es gelungen ist, einen 4,5 ha großen Ausschnitt des Testbestandes mit Original-Erschließungssystem, mit den tatsächlichen Positionen der Erntebäume und mit nahezu identischen, während der Holzernte produzierten Sortimentsabschnitten im Modell abzubilden. **Der Nachweis, bei ausreichender Verfügbarkeit der entsprechenden Daten die realen Strukturen eines Bestandes nahezu 1:1 in der Software zu rekonstruieren, ist mit diesem Versuch geführt worden**.
Beim System **Harvester** ließ der Vergleich der Ergebnisse aus der Referenzzeitstudie von POHL (2006) mit den Modellberechnungen **zuerst den Eindruck** entstehen, **dass das Modell „zu produktiv arbeite“**. Allerdings konnte dieser Eindruck im Zuge weiterer Leistungsvergleiche aus sechs zusätzlichen Zeitstudien wieder entkräftet werden. Der **hohe Grad an Übereinstimmung der Leistungskennzahlen des Modells mit denen in einer Literaturstudie untersuchten Produktivitätsformeln** erlaubt die Schlussfolgerung, **dass das System Harvester im Modell realistische Werte berechnet**. Vielmehr scheint die Leistung des Harvesterfahrers während der Referenzstudie von POHL in einem eher unterdurchschnittlichen Leistungsbereich gelegen zu haben.
Für das System **Forwarder** konnten beim Vergleich der tatsächlich durchgeführten Holzernteoperation mit der im Modell nachempfundenen Simulation ebenfalls **gute Ergebnisse** erzielt

werden, deren Qualität aber im Zuge weiterer Zeitstudien und Testläufe noch genauer getestet werden sollte.

Weitere Untersuchungen sollten aber im Rahmen einer detailliert fortgeführten Validierung stattfinden, eine Aufgabe, die sicherlich den Umfang einer kompletten Dissertation besitzt. Im Laufe dieser Studien sollten dann auch die drei anderen **Systeme Motormanuelle Holzernte, Schlepper und Pferd getestet werden**. Denn auch wenn sie mit relativ „ergebnissicheren" Tarifwerken kalkulieren, sollte zumindest an einem Beispiel die Funktionalität dieser Tarife überprüft werden.

11.2.3 Einsatz des Modells in der Forschung

Beim Einsatz in der Forschung ist das Modell in seinem heutigen Entwicklungsstatus **uneingeschränkt nutzbar**. Für die Wissenschaftler besteht die Möglichkeit, unabhängig von realer Existenz oder Umsetzung hypothetischer Annahmen, **jede Art von Bestandesfläche, Erschließungssystem, aufstockendem Bestand, Holzernteeingriff, Aushaltung und – bei entsprechender Verfügbarkeit der Daten - Arbeitssystem bzw. Arbeitssystemkombination im Modell abzubilden** und in dieser virtuellen Umgebung eine Vielzahl von Versuchen durchzuführen. Dabei können für die bisher fünf simulierbaren Systeme eine Vielzahl von Parametern definiert werden. Sei es die genaue Fahrtroute eines Harvesters durch den Bestand, die exakte Rückestrategie in Abhängigkeit der über den Volumenfaktor zu berücksichtigenden Auslastung des Rungenkorbes eines Forwarder oder die Aushaltung von Langholz, das in der Folge motormanuell gefällt, mit einem Pferd vorgerückt und durch einen Schlepper zur Waldstraße transportiert wird, die Möglichkeiten der Darstellung sind äußerst vielfältig.

Wie lange muss beispielsweise ein Forwarder warten, bevor er mit seiner Arbeit beginnen kann, weil der Harvester zuerst noch vier neue Rückegassen freischneiden muss? Interaktionen zwischen einzelnen Arbeitssystemen lassen sich im Modell viel besser beobachten als während einer Zeitstudie im Bestand selbst. Wo liegen Schwachstellen im System? Wie wirkt sich eine ältere, von häufigen Störungen betroffene Maschine auf den Ablauf der einzelnen Operationen aus? Kann die Aushaltung der Sortimente die Produktivität der eingesetzten Arbeitssysteme verbessern? Wie viele Kilometer ist eine Maschine durch einen bestimmten Bestand mit einem bestimmten Rückegassensystem gefahren und hat den Boden belastet? Kann man diese Belastung durch Änderung der Rückestrategie oder der Fahrtroute reduzieren? Welche Sortimente sollten unter Berücksichtigung der aktuellen Holzernte beim nächsten Eingriff in fünf Jahren vorzugsweise ausgehalten werden, um ein möglichst gutes Ergebnis zu erzielen? Wie wirkt es sich aus, dass ein noch relativ unerfahrener Maschinenführer zum Einsatz kommt? Wie lange dauert der Eingriff, wenn anstatt 1 ½ Schichten 2 Schichten gefahren werden? Wo liegen die Kosten, wenn die Waldarbeiter die Stämme nach der Ernte noch entrinden? Wie wird ein neues Maschinensystem in der Praxis arbeiten?

Diese Liste mit potenziellen Fragestellungen, die sich mit Hilfe des Modells untersuchen lassen, könnte noch fortgesetzt werden. Sie beschreibt das umfangreiche und variable Einsatzspektrum der

hier entwickelten Software. **Für alle fünf Verfahren lassen sich deutliche Tendenzen hinsichtlich Dauer, Kosten und Leistung ihres Einsatzes aus den Aussagen der Rechenergebnisse ableiten**. Für die Forschung stellt das Modell einen **großen Schritt in Richtung der Präzisionsforstwirtschaft** dar, ein Weg, der auch in Zukunft konsequent weiterverfolgt werden wird.

11.2.4 Einsatz des Modells in der Praxis

Hinsichtlich der Leistungsfähigkeit des Modells ist ein **Einsatz in der forstlichen Praxis** auch zum heutigen Zeitpunkt **wünschenswert**. **Für Entscheidungsträger an unterschiedlichsten Positionen** wie beispielsweise in Forstämtern, bei Waldbesitzervereinigungen oder in der Verwaltung von Holzernteunternehmen **kann die Software** durch die Berechnung wichtiger Kennzahlen und den Vergleich unterschiedlicher Szenarien **Planungsaufgaben, aber auch Nachbetrachtungen schon durchgeführter Einsätze unterstützen**. Längerfristig gesehen wird es auch genau dieser Bereich sein, in dem die Software genutzt werden wird.
Zurzeit ist im Rahmen einer Projektweiterführung durch das Land Nordrhein-Westfalen eine Übertragung der einzelnen Systemkomponenten von AutoMod auf eine neue Software namens Cosimir geplant. Cosimir wird im Moment für die Modellierung des so genannten „Digitalen Waldes“ verwendet, ein Modell weitaus größerer, ebenfalls real existierender Waldflächen (> 100 ha), deren Daten mit Hilfe von LIDAR-Vermessungen[39] gewonnen werden. Sollte dieses Projekt erfolgreich umgesetzt werden, wäre ein weiterer, entscheidender Schritt in Richtung eines Praxiseinsatzes der Holzerntesimulation geschafft.
Aktuell erschweren der **große zeitliche Aufwand bei der Datensammlung und –aufbereitung**, der notwendige **Einsatz von insgesamt drei Softwareanwendungen** sowie die, aufgrund der inzwischen erreichten hohen Komplexität der simulierten Szenarien zum Teil recht **lange Berechnungsdauer** am PC eine zügige Bearbeitung und Simulation. Diese, unter dem Überbegriff „**mangelnde Benutzerfreundlichkeit**“ zusammengefassten Probleme können aber im weiteren Verlauf der Forschungs- und Entwicklungsarbeiten behoben werden.

11.2.5 Einsatz des Modells in der Lehre

Durch Orientierung an speziellen forstlichen Fragestellungen aus dem Bereich der Holzernteplanung lassen sich problemlos zahlreiche simulierbare Szenarien **in der Lehre an Universitäten und**

[39] Lidar ist eine Technik zur Entfernungsmessung mit Laserstrahlen. Ein Lidar-System besteht aus einer Laserdiode als Strahlungsquelle und einer Empfangseinrichtung mit der die an Objekten reflektierten Laserstrahlen empfangen werden. Die Empfangseinrichtung besteht aus einer Lawinenfotodiode (APD), die die reflektierten Laserstahlen detektiert und einer nachgeschalteten Signalaufbereitung aus Variable-Gain-Verstärker (VGA) und A/D-Wandler. Lidar-Systeme werden in militärischen Bereichen eingesetzt, aber auch in der Automotive-Technik in Fahrerassistenz-Systemen und in Mautsystemen zur Fahrzeugerkennung. Die Laser der Lidar-Systeme gehören der Laserklasse 1 an und sind daher ungefährlich und eigensicher (WIKIPEDIA, 2006).

Fachhochschulen sowie im Unterricht in Waldarbeitsschulen oder bei der Ausbildung von Maschinenführern einsetzen. Ein Beispiel könnte die Untersuchung der Auswirkungen der Verringerung eines durchschnittlichen Rückegassenabstandes von 30 m auf 20 m auf die Erreichbarkeit der Erntebäume durch den Harvester im Vergleich zu den zusätzlichen Fahrtkosten und des Zeitaufwandes sein. Die Kriterien der sinnvollen Gestaltung eines Erschließungssystems könnten auf diese Weise Schülern und Studenten durch Kalkulation und Vergleich der einzelnen Ergebnisse und gleichzeitiger graphischer Präsentation der unterschiedlichen Szenarien verdeutlicht werden. So bekommen sie schon im frühen Stadium ihrer Ausbildung ein Gefühl **für die ökonomischen, logistischen, aber auch ökologischen Zusammenhänge, die es bei der Planung und Umsetzung von Holzernteeingriffen zu beachten gilt**.

BRUCHNER (2004) verwies in ihrer Arbeit schon auf die Möglichkeit, die Software im Bereich des e-learning (electronic learning, computer based learning) einzusetzen. E-learning wird dabei im Wesentlichen als interaktives Bindeglied zwischen theoretischer Wissensvermittlung und erster praktischer Umsetzung betrachtet. Es ersetzt zwar nicht die realen Erfahrungen im Arbeitsalltag, dennoch bereitet das Erleben von realitätsnahen Szenarien am Computer auf eintretende Arbeitssituationen vor und erlaubt ein Experimentieren ohne unerwünschte Konsequenzen hinsichtlich Arbeitssicherheit oder ökonomischer Einbußen aufgrund eines Fehlverhaltens.

Der **Einsatz des Modells in der Lehre** ist also auch heute schon **uneingeschränkt zu empfehlen**.

11.3 Ausblick

Der Ausblick beschreibt in seinem ersten Teil einige allgemeine Dinge über die zukünftig geplante Vorgehensweise im Forschungsgebiet „Holzerntesimulation“. Im zweiten Teil werden präzise Handlungsempfehlungen hinsichtlich einer konsequenten Weiterentwicklung des bestehenden Modells erläutert.

11.3.1 Allgemeine Vorgehensweise

Von Seiten der Forschung aus besteht kein Zweifel darüber, dass die in dieser Arbeit entwickelte Holzerntesimulation bereits über ein großes Potenzial und eine hohe Leistungsfähigkeit bei der Abbildung forstlicher Strukturen und Arbeitsprozesse verfügt. Aus diesem Grund soll auch in Zukunft weiter an der Verbesserung dieser Simulation gearbeitet werden. Im Wesentlichen stehen aus heutiger Sicht dabei zwei unterschiedliche Vorgehensweisen zur Verfügung:

1. Weiterentwicklung des bestehenden Modells
2. Implementierung der bestehenden Funktionen in die Software Cosimir

Genaue Informationen über die Art und Weise der Weiterentwicklung des bestehenden Modells gibt Kapitel 11.3.2. Zu der vom bisherigen Auftraggeber, der Landesanstalt für Ökologie, Bodenordnung und Forsten des Landes NRW, favorisierten, zweiten Vorgehensmöglichkeit ist zu sagen, dass eine Implementierung in die zur Darstellung großflächiger, real existierender Waldflächen (Virtueller Wald) genutzte Software Cosimir durchaus Potenzial bietet, um das Ziel der Abbildung tatsächlicher forstlicher Strukturen und Arbeitssysteme zu erreichen. Inwieweit diese Überführung gelingt, ist zum heutigen Zeitpunkt schwer abzuschätzen.

11.3.2 Weiterentwicklung des bestehenden Modells

Alle hier genannten Punkte könnten die Leistungsfähigkeit des aktuellen Modells deutlich steigern und würden gleichzeitig eine weitere Verbesserung hinsichtlich der übergeordneten Zielformulierung bedeuten.

1. Schnittstellen-Standardisierung zur Generierung einer Simulationssoftware-externen Datenbank

Ein wichtiges Ziel muss es sein, das Einpflegen neuer Bestandes- und Erschließungsnetzdaten für den Nutzer so einfach wie möglich zu gestalten und ihm somit die Möglichkeit zu geben, jedwedes Bestandes- und Aktionsszenario in angemessener Zeit modellieren bzw. simulieren zu können. Um dieses Ziel zu erreichen, ist es notwendig, sowohl eine ausreichende Datengrundlage zu schaffen, als

auch diese Daten standardisiert in einer Datenbank zu verwalten. Dies bedeutet, dass der Nutzer mit einer beliebigen Simulationssoftware, sei es AutoMod oder Cosimir, direkt auf diese Datenquelle zugreifen kann. Dabei werden Informationen über

- die Einzelbäume,
- die Sortimente,
- die Bestandesfläche und
- das Erschließungssystem

vereinigt.
Den entscheidenden Punkt hierfür stellen verschiedene **Verbesserungen der Schnittstellen** dar, deren Einsatz natürlich auch die Benutzerfreundlichkeit des gesamten Modells deutlich erhöht.

1.1 Verbesserung der Schnittstelle SILVA => HOLZERNTE

Da im Moment noch nicht absehbar ist, zu welchem Zeitpunkt und in welcher Qualität die Bestandes- bzw. Einzelbaumdaten aus Befliegungen und LIDAR-Vermessungen für die Anwendung im Modell zur Verfügung stehen werden, muss vorerst weiterhin der Waldwachstumssimulator SILVA für die Bestandesgenerierung verwendet werden. Diese Vorgehensweise entspricht nicht dem Idealzustand, da einzelbaumweise Realdaten die Ergebnisqualität und Datenhandhabung deutlich verbessern würden, sie stellt aber die bestmögliche Alternative dar.
SILVA liefert als Ergebnis der Bestandesmodellierung eine MS Excel-Tabelle mit Informationen über Art, BHD, Höhe, Position und Entnahme jedes Baumes. Um mit diesen Informationen in HOLZERNTE weiterarbeiten zu können, müsste die entsprechende Tabelle umformatiert und anschließend in ein spezielles MS Access-Verzeichnis der HOLZERNTE-Software exportiert werden. Dieser Arbeitsschritt ist relativ zeitaufwendig und sollte daher mit Hilfe einer Schnittstellenverbesserung unter Einsatz eines entsprechenden Dateidialoges vereinfacht werden. Gleichzeitig sollten die Einzelbaumdaten aus SILVA auch in der externen, zentralen Datenbank abgelegt werden.

1.2 Verbesserung der Schnittstelle HOLZERNTE => externe Datenbank

Die zweite Programmschnittstelle betrifft den Transfer der in HOLZERNTE gewonnenen Sortimentsinformationen in die zentrale Datenbank. Hier müssten mit Hilfe spezieller Verknüpfungen jedem Einzelbaum automatisch „seine“ Sortimente zugeordnet werden. Diese Option ist zwar im Moment schon in das Modell integriert, die notwendigen Tabellenformatierungen sollten dem Nutzer aber noch durch eine entsprechende Vereinfachung erspart werden.

1.3 Verbesserung der Schnittstelle GIS => externe Datenbank

Der Einsatz eines GIS bezieht sich bei der Modellerstellung auf folgende Punkte:

- Einpflegen neuer Flächenbegrenzungs- und Erschließungsnetz-Daten
- Einpflegen weiterer digitaler Karten
- Einpflegen eines Digitalen Geländemodells (DGM)

a. Einpflegen neuer Flächenbegrenzungs- und Erschließungsnetz-Daten

Verfügt der Nutzer über Informationen über den Grenzverlauf und das Erschließungssystem des zu modellierenden Bestandes in Form von Koordinaten in einem GIS, so sollten diese Daten über eine Schnittstelle direkt in die zentrale Datenbank überführt werden. Dort müsste dann im Anschluss die Umrechnung der Koordinaten auf ein lokales Koordinatensystem erfolgen. Die entsprechende Bestandesgrundfläche bzw. das Gassennetz werden anschließend nach der Übernahme der Daten in die Simulationssoftware automatisch erzeugt.

b. Einpflegen weiterer digitaler Karten

Liegen für die entsprechenden Bestände digitale Karten, z.B. Bodenkarten in einem GIS vor, mit deren Hilfe zusätzliche Details der zu simulierenden Fläche abgebildet werden könnten, sollten diese mit Hilfe eines speziellen Makros in Zahlen- bzw. Koordinatenformate aus- und in die zentrale Datenbank eingelesen werden.

c. Einpflegen eines Digitalen Geländemodells (DGM)

Zur Verfügung stehende digitale Geländemodelle sollten mit Hilfe einer speziell entwickelten Schnittstelle in Form von X-, Y- und Z-Koordinaten direkt in die zentrale Datenbank übertragen werden können und dort mit einem realen oder vereinfachten Erschließungssystem verknüpft werden. Ebenso müssten die Bäume mit ihrer individuellen Position automatisch an die dreidimensionalen Gegebenheiten angepasst werden.
Die Implementierung eines DGM stellt einen ganz entscheidenden Schritt zur Umsetzung der übergeordneten Zielvorgabe „Abbildung realer Strukturen“ dar. Die Berücksichtigung der tatsächlichen Geländeverhältnisse sowie die Simulation ihrer Auswirkungen auf die verschiedenen Arbeitssysteme haben daher eine besonders hohe Bedeutung.

Diese, in den Punkten 1.1 – 1.3 erläuterten Schnittstellen-Standardisierungen würden im Endergebnis zur Generierung einer mit allen zur Bestandes-Modellierung notwendigen Informationen ausgestatteten Datenbank beitragen. Auf diese Datenbank könnte dann von verschiedenen Seiten zugegriffen werden, was, wie bereits erwähnt, gleichzeitig auch die Benutzerfreundlichkeit deutlich erhöht.

1.4 Automatische Verteilung der Bäume über die Bestandesfläche

Aufgrund der begrenzten Flächengröße der in SILVA erzeugten Bestände, ist eine Vervielfältigung dieser notwendig. Durch „Klonen“ ist es möglich, die gesamte Bestandesfläche des Modells mit Bäumen aufzufüllen. Dies sollte in Zukunft mit Hilfe bestimmter Verknüpfungen in der zentralen Datenbank automatisch und nicht mehr, wie bisher, von Hand durchgeführt werden.

2. Modellinterne Verbesserungen

Sind die beschriebenen Schnittstellen-Standardisierungen im Wesentlichen auf die Erstellung einer externen, zentralen Datenbank ausgerichtet, geht es bei den nun folgenden Handlungsempfehlungen um modellinterne Verbesserungen.

2.1 Automatische Generierung vereinfachter Rückegassensysteme auf einer bekannten Fläche

Liegen für einen Bestand keinerlei Informationen über das Rückegassennetz vor, sollte der Nutzer die Möglichkeit haben, durch Festlegen von Richtungsverlauf (Nord-Süd, Ost-West) oder Rotationswinkel und Gassenabstand ein schematisch vereinfachtes Erschließungsnetz über die Fläche zu verteilen. Diese Option erscheint deshalb besonders wichtig, da die Datengrundlage im Bereich Erschließung oft noch unzureichend ist.

2.2 Automatische Festlegung einer möglichen Fahrtroute für Harvester und Forwarder

Das bisherige Vorgehen verlangt vom Nutzer, für die Systeme Harvester und Forwarder eine genaue Fahrtroute festzulegen und in die Software einzupflegen. Diese Option wird nach wie vor beibehalten, allerdings sollte zusätzlich eine, im Anhalt an das zuvor generierte Rückegassennetz automatisch erzeugte Route zur Verfügung gestellt werden, um eine zusätzliche Zeitersparnis zu ermöglichen.
Dem Nutzer sollte gleichzeitig eine Liste sowie eine Abbildung der nummerierten Gassen und Gassenabschnitte zur Verfügung gestellt werden, mit deren Hilfe er die Maschinen auch eigenständig navigieren kann.

2.3 Simulation steigungs- bzw. gefällebedingter Auswirkungen auf die Arbeitssysteme

Nach Implementierung eines digitalen Geländemodells könnten die Auswirkungen von Gefälle und Steigung auf die Arbeitssysteme simuliert werden. Dies betrifft besonders die Produktivität der Maschinen. Aus diesem Grund müssten zusätzliche Literatur- und evtl. Praxisstudien zu diesem Themenfeld durchgeführt werden.

3. Simulation zusammenhängender Flächen

3.1 Darstellung mehrerer räumlich zusammenhängender Bestände in einem Modell, inkl. Simulation von Interaktionen

Als weiterer Punkt wird die Erweiterung der zu simulierenden Flächen bzw. Bestände angesehen. Ziel muss es sein, mehrere, flächig zusammenhängende Bestände sowie Interaktionen zwischen diesen in einem Modell zu simulieren. Dazu gehört beispielsweise die Implementierung neuer Baumarten und Bestandesformen, aber auch die Darstellung von Umsetzvorgängen von einem Bestand zum anderen.
Den limitierenden Faktor bei diesem Entwicklungsschritt stellt zurzeit noch die Hardware dar. Im Moment wird von einer sinnvoll zu simulierenden Maximalfläche von ca. 20 ha bzw. von etwa 20.000 Bäumen ausgegangen. Das Modell wäre auch zum heutigen Zeitpunkt schon in der Lage, mit einer noch größeren Anzahl an Informationen zu arbeiten, allerdings begrenzen die Rechnerleistungen die Ausdehnung über die genannten Grenzen hinaus, da es sonst zu einer benutzerunfreundlichen Rechendauer kommen würde.

4. Implementierung aktueller Holzpreise

Um dem Benutzer der Software nicht nur die voraussichtlichen Kosten des bevorstehenden Holzernteeingriffs zu berechnen, sondern ihm gleichzeitig die Möglichkeit zu geben, den monetären Erfolg einer simulierten Arbeitsvariante zu präsentieren, sollte die Möglichkeit geschaffen werden, nach Abschluss der Definition der einzelnen Lose für jedes Los einen aktuellen Holzpreis im Frontend der Software festzulegen. Im Verlauf eines Simulationslaufes könnte dann der erntenkostenfreie Erlös direkt ermittelt werden.

5. Validierung der Modellfunktionen

Zu diesem Punkt wurde bereits zuvor einiges gesagt. Klar ist, dass erst eine umfassende Validierung der Funktionsweisen aller fünf Arbeitssysteme, mindestens aber der Systeme Harvester und Forwarder durchgeführt werden muss, um die während der Simulation berechneten Ergebnisse in ihrer Qualität auch entsprechend bewerten zu können. Diese Aufgabe sollte in Form einer separaten Dissertation umgesetzt werden.

12 Zusammenfassung

Im Rahmen ihrer Dissertation gelang es BRUCHNER (2004), die bisher nur in anderen Industriezweigen (z.B. Automobilindustrie) eingesetzte Simulationssoftware AutoMod zum ersten Mal auf den Bereich der Forstwirtschaft, genauer gesagt den Bereich der forsttechnischen Produktion anzuwenden. Durch Modellierung eines 1 ha großen, schematisch aufgebauten Fichtenreinbestandes und Simulation der beiden forstlichen Arbeitssysteme Harvester und Forwarder, war es ihr möglich, systemspezifische Kennzahlen (Dauer, Produktivität und Kosten) eines Holzernteeingriffs, die unter Berücksichtigung des direkten Einflusses verschiedener Bestandeseigenschaften (Erschließungssystem, Baumart, Baumposition und Dimensionen der einzelnen Stämme und Stammabschnitte) berechnet wurden, zu ermitteln.
Als Intention ihrer Arbeit formulierte sie damals das übergeordnete Ziel der Simulation real existierender, forstlicher Strukturen auf Einzelbaum-Ebene und ausgewählter, in der Praxis eingesetzter Arbeitssysteme, die in Abhängigkeit der speziellen Charakteristika der jeweiligen Bestandesszenarien Ergebniswerte liefert, die wiederum zu einem späteren Zeitpunkt als Grundlage für Entscheidungs- und Planungsaufgaben in der forstlichen Praxis dienen sollen.
BRUCHNER erreichte dieses Ziel in ihrer Arbeit nur zum Teil, legte allerdings durch die Entwicklung eines ersten Basismodells den Grundstein für die hier vorliegende Arbeit. Das von ihr entworfene und in Kooperation mit IT-Spezialisten der Firma Brooks realisierte Basismodell besaß im Hinblick auf die Abbildung der forstlichen Strukturen und Arbeitssysteme noch großes Potenzial für weitere Entwicklungen.
Dieses Potenzial galt es weiter auszuschöpfen, was mit der Erstellung der hier präsentierten Arbeit getan wurde. Es kann auch in diesem Fall noch nicht davon gesprochen werden, dass das übergeordnete Ziel bereits vollständig erreicht wurde, doch ist es gelungen, zahlreiche Erweiterungen und Innovationen in ein neu konzipiertes Testmodell eines real existierenden, ca. 11 ha großen Fichtenbestandes zu integrieren. Dabei konnten einige Ansatzpunkte bei der Planung der zu wählenden Vorgehensweise von BRUCHNER übernommen werden, der allergrößte Teil des Konzeptes, wie es in dieser Arbeit beschrieben ist, wurde jedoch komplett neu entwickelt.
In Kooperation mit der Landesanstalt für Ökologie, Bodenordnung und Forsten (LÖBF) des Landes Nordrhein-Westfalen und der Firma SimPlan Integrations aus Witten konnte im Verlauf der vergangenen drei Jahre eine Softwarelösung auf der Basis von AutoMod erstellt werden, die in der Lage ist, bei ausreichender Verfügbarkeit und Qualität der notwendigen Ausgangsdaten jede Art von Bestandesfläche, Erschließungssystem, aufstockenden Baumkollektiven inklusive Informationen über die produzierten Sortimente bei frei wählbarer Aushaltung, Eingriffsart und im Moment eine Auswahl von fünf forstlichen Arbeitssystemen (Harvester, Motormanuelle Holzernte, Forwarder, Schlepper, Pferd) zu modellieren bzw. zu simulieren. Diese, im Versuchsteil der Arbeit nachgewiesene, vielfältige Einsetzbarkeit des aktuellen Modells stellt einen erheblichen Fortschritt im Hinblick auf den ersten Prototypen von BRUCHNER dar. Sie ist das Ergebnis intensiver Forschungsstudien und Versuche im Bereich der Generierung forstlicher Bestandesstrukturen, forstlicher Erschließungssysteme und der Simulation unterschiedlicher Arbeitssysteme, deren „Verhalten“ durch eine Vielzahl von individuell

einstellbaren Parametern an ganz bestimmte, in der Praxis auftretende Situationen angepasst werden kann.

Die Verifizierung des Modells konnte problemlos durchgeführt und erfolgreich beendet werden, die Validierung gestaltete sich deutlich schwieriger, wurde aber mit einer Zahl viel versprechender Versuche begonnen. Eine noch tiefgreifendere Validierung sollte Aufgabe einer eigenständigen Dissertation sein.

Im Bezug auf die Benutzerfreundlichkeit, die Datenhandhabung, die Qualität einiger eingesetzter Produktivitätsformeln und die noch fehlende Berücksichtigung dreidimensionaler Geländeverhältnisse, konnten dennoch nicht alle gewünschten Erweiterungen in das aktuelle Modell integriert werden. Hier besteht weiterhin Forschungsbedarf, der in Form von weiteren Projekten in näherer Zukunft abgedeckt werden soll.

Das Modell in der jetzigen Form soll im Moment in erster Linie für Forschungszwecke und Versuche durch Simulation und Beurteilung bestimmter Arbeitssysteme in bestimmten forstlichen Situationen sowie zu Lehrzwecken eingesetzt werden. Eine direkte Anwendung in der Praxis, abseits von wissenschaftlichen Untersuchungen, wäre zum heutigen Zeitpunkt aufgrund der noch nicht ausreichenden Benutzerfreundlichkeit und der ebenfalls noch nicht durch eine umfassende Validierung abgesicherten Qualität der Kalkulationsergebnisse des Modells evtl. verfrüht.

Die hier vorliegende Arbeit stellt einen entscheidenden Schritt im Bereich der Simulation forsttechnischer Holzernteoperationen dar, der bereits bei der Präsentation auf zahlreichen nationalen und internationalen Kongressen und Tagungen von der Fachwelt gewürdigt worden ist.

Verzeichnisse

Abkürzungsverzeichnis

AZ = Allgemeine Zeiten
B = Qualitätsbezeichnung nach Gütesortierung der HKS
BHD = Brusthöhendurchmesser (1,30 m Höhe)
CAD = Computer Aided Design
CGW = Qualität „C“ mit geringem Wert (Sortimentsbezeichnung)
DGM = Digitales Geländemodell
EST = Erweiterter Sortentarif
fm = Festmeter (in Erntefestmeter mit Rinde)
FS = Forststraße
GAZ = Gesamtarbeitszeit
GIS = Geographisches Informationssystem
HKS = Handelsklassensortierung
IL = Industrieholz „lang“
IN = Industrieholz (gesund, nicht grobastig, keine starke Krümmung)
IS = Industrieholz kurz (Sortimentsbezeichnung)
L1b1 = Bezeichnung nach Mittenstärkensortierung der HKS für Stammabschnitte mit einem Mittendurchmesser von 15 bis 16 cm
L1b2 = Bezeichnung nach Mittenstärkensortierung der HKS für Stammabschnitte mit einem Mittendurchmesser von 17 bis 19 cm
L2a = Bezeichnung nach Mittenstärkensortierung der HKS für Stammabschnitte mit einem Mittendurchmesser von 20 bis 24 cm
L2b = Bezeichnung nach Mittenstärkensortierung der HKS für Stammabschnitte mit einem Mittendurchmesser von 25 bis 29 cm
LIDAR = Light Detection and Ranging
LPZ = Profilzerspaner lang (Sortimentsbezeichnung)
MAS/MAS15 = Maschinenarbeitsstunde mit Unterbrechungen < 15 Minuten
MTBF = Mean Time Between Failure
MTTR = Mean Time Till Repair
PZ = Profilzerspaner (Sortimentsbezeichnung)
RAZ = Reine Arbeitszeit
RG = Rückegasse
Sek = Sekunden
SILVA = Waldwachstumssimulator des Lehrstuhls für Waldwachstumskunde der TUM
STH = Stammholz (Sortimentsbezeichnung)
Stk = Stück
TAP = Technische Arbeitsproduktivität
UVV = Unfallverhütungsvorschrift
ZEUS = Zukunftsorientiertes Entscheidungsunterstützungssystem
ZG = Zeitgrad

Literaturverzeichnis

AFFENZELLER, G. (2005): Integrierte Harvester – Forwarder - Konzepte (Harwarder), Diplomarbeit am Department für Wald- und Bodenwissenschaften der Universität für Bodenkultur, Wien

BALZERT, H. (2005): UML 2 kompakt, Spektrum Akademischer Verlag

BANKS, J. (1998): Handbook of Simulation-Principles, Methodology, Advances, Applications and Practice, New York, USA, John Wiley & Sons, Inc

BANKS, J., CARSON, J., NELSON, B. (1999): Discrete-event simulation, New Jersey, USA, Prentice Hall, Inc

BOLLIN, N. (1998): Nachweis über die Reduzierung des Energieverbrauchs eines Timberjack 1270 A Harvester durch das Hydrauliksystem “Eco-MATE”, Diplomarbeit am Lehrstuhl für Forstliche Arbeitswissenschaft und Angewandte Informatik der TU München

BROCKHAUS (2003): Enzyklopädie, Verlag F.A. Brockhaus, Wiesbaden

BROOKS (2003): AutoMod User´s Guide, Brooks Automation Inc., Benutzerhandbuch zur Simulationssoftware AutoMod

BRUCHNER, A.-K. (2004): Industrielle Simulationssoftware als Entscheidungsunterstützungs-instrument in der Produktionslogistik der Holzerntekette, Dissertation am Lehrstuhl für Forstliche Arbeitswissenschaft und Angewandte Informatik der TU München

BWI II (2005): Ergebnisse der zweiten Bundeswaldinventur, URL: www.bundeswaldinventur.de

CAVALLI, R. (2003): Mündliche und schriftliche Überlieferung verschiedener Datensätze zum Arbeitssystem Pferd

CLAUSEN, U. (2002): Mündliche Überlieferung, Kongress „Logistik Innovativ“, Prien

DIETZ, P., KNIGGE, W., LÖFFLER, H. (1999): Walderschließung, Blackwell Wissenschafts-Verlag

EBERHARDINGER, A. (2006): Einsatzbereiche und Potenziale des Wisent Dual der Firma Ponsse, Forschungsbericht des Lehrstuhls für Forstliche Arbeitswissenschaft und Angewandte Informatik der TU München, unveröffentlicht

FELDKÖTTER, D. (2004): Mündliche und schriftliche Überlieferung verschiedener Datensätze zu den Arbeitssystemen Harvester und Forwarder

FELLER, S.; WEIXLER, H.; PAUSCH, R. (1997): Holzernte in Fichten-Altbeständen mit einem Raupenharvester, AFZ - Der Wald 9/1997, S. 478-481

FREIDHAGER, R. (2006): Das Logistikkonzept der Bayerischen Staatsforsten, Vortrag am 10. Forstlichen Unternehmertag in Freising, 30. März 2006

GABRIEL, O. (2002): Mit dem Timberjack 1470 in der Buche, Forst & Technik 1/2002

GUGLHÖR, W. (1995): Pflegliche Durchforstung mit Holzerntemaschinen, Abschlußbericht zum Projekt V25. Bayerische Landesanstalt für Wald- und Forstwirtschaft.

HEMM, M. (2002): Softwareeinsatz für die Produktionslogistik in der Holzernte, Diplomarbeit am Lehrstuhl für Forstliche Arbeitswissenschaft und Angewandte Informatik der TU München

HEMM, M., BRUCHNER, A.-K. (2003): Decision support in German forestry by using industrial simulation software, Proceedings zum "Symposium For Systems Analysis In Forest Resources", USDA Forest Service, Society of American Foresters, 7.-9. Oktober 2003, Stevenson, Washington, USA

HRADETZKY , J., SCHOPFER, W. (2001): Das Softwareprodukt Holzernte – Eine Entscheidungshilfe für die Holzvermarktung, AFZ – Der Wald 21/2001, S. 1100-1101

IHB (2006): Aktuelle Holzpreise, Internationale Holzbörse, www.ihb.de

JACKE, H. (2003): Tabellenwerk des Schleppertarifs für das Land NRW, Institut für Forstliche Arbeitswissenschaft und Verfahrenstechnologie der Georg-August-Universität Göttingen

JACKE, H. (2003): Holzernteverfahren und Holztransport – Kosten des Skidderns und Vorrücken mit Pferden, Informationen zum Projekt „Analyse eines forstlichen Eingriffs“, Institut für Forstliche Arbeitswissenschaft und Verfahrenstechnologie der Georg-August-Universität Göttingen

JOOSTEN, R. (2005): Mündliche Überlieferung

KÄMPF, R., GIENKE, H. (2002): Servicedenken schlägt Kostendenken, www.ebz-beratungszentrum.de

KENNEL, E. (2001): Unterlagen zur Vorlesung „Forsteinrichtung“ des Lehrstuhls für Waldbau und Forsteinrichtung an der Technischen Universität München

KRAMER, H., AKÇA, A. (1995): Leitfaden zur Waldmesslehre, J.D. Sauerländer´s Verlag, 3. erweiterte Auflage

KUDLICH, T. (2000): Optimierung von Materialflusssystemen mit Hilfe der Ablaufsimulation, Dissertation der Fakultät für Maschinenwesen, Lehrstuhl für Fördertechnik, Materialfluss und Logistik der TU München

KULUSIC, B. (1971): Untersuchung über das Rücken von Nadelholz unter besonderer Berücksichtigung der Belieferung von Holzhöfen. Institut für Forstbenutzung und Forstliche Arbeitswissenschaft der Universität Freiburg

KWF (2004): Kuratorium für Waldarbeit und Forsttechnik, URL: www.kwf-online.de

KWF (1990): Holzrücken mit Pferden, KWF-Merkblatt

LÖFFLER, H. (1990): Arbeitswissenschaft, Leitfaden zu den Lehrveranstaltungen für Studierende der Forstwissenschaften, Lehrstuhl für Forstliche Arbeitswissenschaft und Verfahrenstechnik der Universität München

LÖFFLER, H. (1991): Forstliche Verfahrenstechnik (Holzernte), Leitfaden zu den Lehrveranstaltungen für Studierende der Forstwissenschaften, Lehrstuhl für Forstliche Arbeitswissenschaft und Verfahrenstechnik der Universität München

LÜTHY, C. (1997): Kalkulationsgrundlagen für das Rücken mit Forwarder, Interner Bericht zu einem Forschungsprojekt der Eidgenössischen Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft, Birmensdorf

LÜTHY, C. (1997): Holzrücken mit Forwarder – Grundlagen zur Leistungsschätzung, Wald und Holz 4/1997

MANTAU, U. (2006): Kampf um den Rohstoff Holz trotz riesiger Potenziale?, AFZ – Der Wald, 3/2006, S. 111-113

MARKMILLER, R. (2002): IT Kompaktkurs Produktionslogistik, BWL-Skript zur Folge 9, FH Deggendorf

MOSANDL, R. (2003): Mündliche Überlieferung

OVER, T. (1996): Waldwirtschaft im Einklang mit der Natur, in: Das Zugpferd, Nr. 1/1996

PAGE, B., BÖLCKOW, R., HEYMANN, A., KADLER, R., LIEBERT, H. (1988): Simulation und moderne Programmiersprachen, Fachberichte Simulation Band 8, Springer Verlag Berlin-Heidelberg

PATZAK, A. (2003): Mündliche Überlieferung der durchschnittlichen Laufgeschwindigkeit von Waldarbeitern im Bestand

PAUSCH, R. (1999): Wechselwirkungen zwischen Bestandsstruktur, biologischer Rationalisierung und forstlichen Verfahrenstechniken in Fichten-/Buchen-Betrieben Bayerns, Abschlußbericht zum Projekt A33. Kuratorium der Bayerischen Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft. Lehrstuhl für Forstliche Arbeitswissenschaft und Angewandte Informatik der TU München.

PAUSCH, R. (2004): Mündliche und schriftliche Überlieferung verschiedener Produktivitätsformeln zu den Arbeitssystemen Harvester und Forwarder

PELTOLA, A. (2004): Mündliche und schriftliche Überlieferung verschiedener Datensätze zu den Arbeitssystemen Harvester und Forwarder aus Langzeitstudien der Firma Timberjack

POHL, R. (2006): Validierung einer Holzerntesimulation mit Hilfe speziell durchgeführter Zeitstudien, Diplomarbeit am Lehrstuhl für Forstliche Arbeitswissenschaft und Angewandte Informatik der TU München

PRETZSCH, H., BIBER, P., DURSKY, J. (2002): The single tree-based stand simulator SILVA: construction, application and evaluation, Forest Ecology and Management 162, S. 3-21

PURFÜRST, F. T. (2004): Berücksichtigung des Fahrereinflusses in Produktivitätsmodellen für Harvester - Methodik und erste Ergebnisse, in Tagungsband Forstwissenschaftliche Tagung - Freising 2004

RIEHLE, C. (1997): Vergleichende Untersuchung des Harvestereinsatzes bei Gruppendurchforstung und Z-Baum orientierter Durchforstung, Diplomarbeit an der Bayerischen Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft (LWF) und dem Lehrstuhl für Forstliche Arbeitswissenschaft und Angewandte Informatik, LMU München

ROSSMANN, J. (2005): Mündliche Überlieferung zum Thema „Auswertung von Befliegungsdaten“ im Zusammenhang mit dem Projekt „Virtueller Wald“

RÜHL, J. (1980): Vergleich des Einsatzes von Kleinseilwinde und Pferd bei der Nadelschwachholzbringung am Beispiel des Bayerischen Forstamtes Ebrach, Diplomarbeit der FH Hildesheim/Holzminden

SAGOWSKI, H. (1988): Mechanisierungskonzept zur Anwendung seilwindenunterstützter Holzernteverfahren, AFZ - Der Wald, Nr. 5/1988

SCHÖDLBAUER, A., DRAHEIM, H. (1982): Rechenformeln und Rechenbeispiele zur Landvermessung II, H. Wichmann Verlag

SCHÖNSLEBEN, P. (2000): Integrales Logistikmanagement – Planung und Steuerung von umfassenden Geschäftsprozessen, 2. Überarbeitete Auflage, Springer Verlag

SCHULZ, A. (1987): Rücken von Kiefernvollbäumen mit Pferd und Schlepper auf unstabilen Böden, Diplomarbeit der FH Hildesheim/Holzminden

STÖHR, D. (2003): Einführung in die Software HOLZERNTE, Kurs an der FVA Baden-Württemberg am 17.11.2003

TARIFVERTRAG, (2000): Tarifvertrag über die Entlohnung von Holzerntearbeiten nach dem Erweiterten Sortentarif (EST) vom 3. Mai 1979 in der Fassung des Änderungs-TV Nr. 17 vom 19. September 2000, Tarifgemeinschaft deutscher Länder

THEES, O. (1998): Verbesserung von Strukturen und Abläufen in der Holzernte, Forum für Wissen, WSL, Birmensdorf, Schweiz, S. 29-35

UVV (1997): Unfallverhütungsvorschrift Forsten, Gesetzliche Unfallversicherung

VALENTA, J., NERUDA, J. (2004): Forwarder als wichtiger Faktor der Arbeitsproduktivität in hochmechanisierter Forstnutzung, Beitrag zum Forschungsprojekt „Dauerhalt auferhaltbare Wald- und Landschaftsbewirtschaftung. Von Konzeption zur Realisierung.“, Institut für Forst- und Holztechnik, Mendel-Universität für Land- und Forstwirtschaft Brno, Tschechische Republik

VISSER, R. (2003): Mündliche Überlieferung

VON BODELSCHWINGH, E. (2006): Analyse der Rundholz Logistik in der Deutschen Forst- und Holzwirtschaft - Ansätze für ein übergreifendes Supply-Chain-Management entlang der gesamten Wertschöpfungskette, Dissertation am Lehrstuhl für Forstliche Arbeitswissenschaft und Angewandte Informatik der TU München

VON BODELSCHWINGH, E. (2004): Das System VALMETrailer, Forschungsbericht am Lehrstuhl für Forstliche Arbeitswissenschaft und Angewandte Informatik der TU München

VON BODELSCHWINGH, E., PAUSCH, R. (2003): Untersuchung zur Kombimaschine Valmet 801 Combi, Forschungsbericht am Lehrstuhl für Forstliche Arbeitswissenschaft und Angewandte Informatik der TU München

VON DER HEIDE, H. C., FRIEDEL, S., BOMBOSCH, F. (2005): Kalkulationsmodell auf der Basis einer Harvesterleistungsanalyse, AFZ – Der Wald 18/2005, S. 962-964

VON UNRUH, B. (2006): Wo bitte geht's zum Polter?, Vortrag am 10. Forstlichen Unternehmertag in Freising, 30. März 2006

WALDHERR, M. (2006): Grenzen der Feinerschließung, Holz-Zentralblatt 27/2006, S. 802

WARKOTSCH, W. (1999): Vollernter und naturnahe Waldwirtschaft - ein Gegensatz? Forst & Technik 9/1999

WARKOTSCH, W., ZIESAK, M. (1998): Die Holzerntekette – Probleme und Lösungsansätze, Beiträge zur Walderschließung und forstlichen Arbeitswissenschaft, Band 8 der Schriftenreihe des Instituts für Forsttechnik Universität Bodenkultur Wien

WIKIPEDIA (2006): Online-Lexikon, URL: www.wikipedia.de

WIRTH, S., BAUMANN, A. (2001): Wertschöpfung durch vernetzte Kompetenzkooperation: Überlebensstrategie für kleine Produktions- und Dienstleistungsunternehmen, Huss-Verlag, München

ZIEGLER, J. (2006): Sie sind verbunden mit der Hotline des EZBI Forsten…, AFZ – Der Wald, 9/2006

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Eingliederung der Simulation in ein Beispiel für die Abläufe forstlichen Produktionsmanagements (Quelle: HEMM, 2002) 3
Abbildung 2: Auszug aus dem Quellcode des Systems Harvester der Software AutoMod 15
Abbildung 3: Luftbild, Bestandesbegrenzungen (GIS) und nummeriertes Rückegassennetz (GIS) eines Testbestandes 16
Abbildung 4: Segmentierung aufgrund einer Richtungsänderung im Rückegassenverlauf 19
Abbildung 5: Schematische Einteilung des Rückegassennetzes mit einem regelmäßigen Abstand von 20 m 21
Abbildung 6: Transformation von Gauß-Krüger-Koordinaten in lokale Koordinaten 22
Abbildung 7: Auszug aus dem Quellcode für das Erschließungssystem der Software AutoMod in MS Excel 23
Abbildung 8: Fertig gestelltes Erschließungssystem des Testbestandes im AutoMod-Modell 24
Abbildung 9: Auszug aus einem Forsteinrichtungswerk des zu simulierenden Testbestandes 26
Abbildung 10: Weg zur Herleitung und Integration der Bestandes- und Sortimentsdaten mit Hilfe der Programme SILVA und HOLZERNTE 26
Abbildung 11: Benutzeroberfläche zur Eingabe der Kennzahlen bei der Bestandesgenerierung in SILVA (SILVA, 2006) 27
Abbildung 12: Graphische Darstellung der simulierten Bestände in SILVA und TreeView (Quelle: http://www.wwk.forst.tu-muenchen.de/info/vis/3D_html) 27
Abbildung 13: Verteilung der Quadranten über die Abteilungsflächen 29
Abbildung 14: "Klonung" der Quadranten mit Hilfe spezieller Abfragen in MS Access 30
Abbildung 15: Zusammenführung der Daten einzelner Bestände in einer Tabelle 30
Abbildung 16: Testbestand mit "geklonten" SILVA-Beständen (oben) und nach Entfernung der „überstehenden“ Bäume (unten) 31
Abbildung 17: Auszug aus der SILVA-Tabelle des Gesamtbestandes inkl. ausscheidendem Bestand 32
Abbildung 18: Unterschiedliche Markierungen der Bäume in der graphischen Darstellung 32
Abbildung 19: MS Access-Tabelle mit Informationen zu den entstandenen Stammabschnitten 33
Abbildung 20: Berechnung und Verknüpfung der Bestandes- und Sortimentstabellen 34
Abbildung 21: Verknüpfung der Bestandesdaten mit den Sortimentsinformationen 35
Abbildung 22: Zuordnung eines Kontrollpunktes zu einem Baum 35
Abbildung 23: Ablagepunkte zur Platzierung der Stämme und Stammabschnitte in vordefiniertem Abstand von 3 m an der Rückegasse 36
Abbildung 24: Automatische Zuordnung jedes Erntebaumes zu einer Bezugsrückegasse bzw. zu einem Kontrollpunkt und Berechnung der Distanz in Meter 37
Abbildung 25: Überschneidung von Bestandesfläche und Quadranten 37
Abbildung 26: Zuordnung der Abteilungsnummern zu den Einzelbäumen mit Hilfe der Quadranten-Nummern 38
Abbildung 27: Entity-Relationship-Diagramm für die Daten des Forstmodells 39
Abbildung 28: Entity-Relationship-Diagramm für die Baumdaten 40
Abbildung 29: Darstellung des übergeordneten Ablaufs im Modell 42
Abbildung 30: Allgemeine Übersicht der Benutzoberfläche des Frontends inkl. Auswahl der Arbeitssysteme 44
Abbildung 31: Gesamtanzahl der Bestandesbäume + Anzahl zu erntender Bäume 45
Abbildung 32: Auswahl der angezeigten Bäume + Vergabe von Simulations- und Experimentnamen 45
Abbildung 33: Ausführbare Aktionen 45
Abbildung 34: Menüleiste des Frontends 46
Abbildung 35: Bedienelemente zum Starten der Simulation 47
Abbildung 36: Baumliste des aktuell zugeordneten Bestandes 47
Abbildung 37: Das Störzeiten-Modul 48
Abbildung 38: Ablaufdiagramm für das Störzeitenmodul 50
Abbildung 39: Das Schichtmodell inkl. Pausen 51
Abbildung 40: Definition der unterschiedlichen Zeitarten 52
Abbildung 41: Allgemeine Übersicht über die wesentlichen Bestandteile des Holzerntemodells 53

Abbildung 42: Klassendiagramm zur zusammenhängenden Darstellung der akteur-spezifischen und übergeordneten Daten 56
Abbildung 43: Detaillierte Übersicht Teil I 57
Abbildung 44: Detaillierte Übersicht Teil II 59
Abbildung 45: Detaillierte Übersicht Teil III 61
Abbildung 46: Detaillierte Übersicht Teil IV 63
Abbildung 47: Datenfluss Teil I 65
Abbildung 48: Datenfluss Teil II 68
Abbildung 49: Erzeugung des Layouts im Modell 69
Abbildung 50: Kontrolle der Position eines Baumes mit Hilfe seines Lotfußpunktes 70
Abbildung 51: Menü des Arbeitssystems Harvester zur Einstellung der verschiedenen Parameter 73
Abbildung 52: Maschinenkostenkalkulation 75
Abbildung 53: In Abschnitte eingeteiltes Erschließungsnetz und Eingabe der Gassenreihenfolge für den Harvester im Benutzermenü des Holzerntemodells 77
Abbildung 54: Ablaufdiagramm für das Arbeitssystem Harvester 78
Abbildung 55: Übersicht über die Eingangs-, Ausgangs- und Zustandsdaten des Arbeitssystems Harvester 80
Abbildung 56: Darstellung des Harvesters im Modell 81
Abbildung 57: Menü des Arbeitssystems Motormanuelle Holzernte zur Einstellung der verschiedenen Parameter 82
Abbildung 58: Übersicht über Lose, Sortimente und Zuordnung zur entsprechenden EST-Tabelle 84
Abbildung 59: Struktur der im EST vorgesehenen Zuschläge (Standorts- und Bestandesbezogene Hiebsmerkmale) 86
Abbildung 60: Struktur der im EST vorgesehenen Zuschläge (Baumbezogene Hiebsmerkmale 1) 86
Abbildung 61: Struktur der im EST vorgesehenen Zuschläge (Baumbezogene Hiebsmerkmale 2) 87
Abbildung 62: Einstellung der EST-Zuschläge im Modell 88
Abbildung 63: %-Werte zur Reduzierung der GAZ auf RAZ-Niveau und Aufteilung der RAZ in die einzelnen Prozess-Abschnitte 89
Abbildung 64: Ablaufdiagramm für das Arbeitssystem Motormanuelle Holzernte 91
Abbildung 65: Darstellung der Sicherheitsradien bei zwei Waldarbeitern während der Motormanuellen Holzernte 93
Abbildung 66: Übersicht über die Eingangs-, Ausgangs- und Zustandsdaten des Arbeitssystems Motormanuelle Holzernte .94
Abbildung 67: Darstellung der Waldarbeiter im Modell 95
Abbildung 68: Menü des Arbeitssystems Harvester zur Einstellung der verschiedenen Parameter 96
Abbildung 69: Menü zur Einstellung von Sortengruppennummer und Volumenfaktor 98
Abbildung 70: Menü zur Polteraktivierung und Vergabe der Polternummer 99
Abbildung 71: Ablaufdiagramm für das Arbeitssystem Forwarder 100
Abbildung 72: Übersicht über die Eingangs-, Ausgangs- und Zustandsdaten des Arbeitssystems Forwarder 102
Abbildung 73: Darstellung des Forwarders im Modell 103
Abbildung 74: Menü des Arbeitssystems Schlepper zur Einstellung der verschiedenen Parameter 104
Abbildung 75: Struktur der verschiedenen Arbeitsstrategien des Schleppers 106
Abbildung 76: Struktur der Zu- und Abschläge für Bestandesschäden 106
Abbildung 77: Prozentwerte zur Reduzierung der GAZ auf RAZ-Niveau und Aufteilung der RAZ in die einzelnen Prozess-Abschnitte 107
Abbildung 78: Ablaufdiagramm für das Arbeitssystem Schlepper 109
Abbildung 79: Übersicht über die Eingangs-, Ausgangs- und Zustandsdaten des Arbeitssystems Schlepper 111
Abbildung 80: Darstellung des Schleppers im Modell 111
Abbildung 81: Menü des Arbeitssystems Schlepper zur Einstellung der verschiedenen Parameter 112
Abbildung 82: Ablaufdiagramm für das Arbeitssystem Pferd 115
Abbildung 83: Übersicht über die Eingangs-, Ausgangs- und Zustandsdaten des Arbeitssystems Pferd 117
Abbildung 84: Darstellung des Pferdes im Modell 118
Abbildung 85: Auszug aus der Maschinendatenbank 118
Abbildung 86: Auswahl der entsprechenden Maschine bzw. der vorab definierten Systemparameter im Frontend der Arbeitssysteme 118
Abbildung 87: Auszug aus der Ergebnisübersicht für die einzelnen Polter 119
Abbildung 88: Versuchs-Anordnung für die fünf Arbeitssysteme inkl. untersuchter Parameter 130

Abbildung 89: Die drei Erschließungsszenarien mit regelmäßigen Gassenabständen von 20 m, 30 m und 40 m 132
Abbildung 90: Vergleich der Anzahl an Bäumen des aufstockenden Bestandes, an Erntebäumen und an Bäumen auf Rückegassen und Forststraßen, die durch eine Ausweitung des durchschnittlichen Gassenabstandes von 20 m auf 30 m und 40 m beeinflusst werden 133
Abbildung 91: Vergleich der durchschnittlichen Brusthöhendurchmesser und der durchschnittlichen Höhen des aufstockenden Bestandes und der Erntebäume über die drei unterschiedlichen Erschließungsszenarien (20 m, 30 m und 40 m Gassenabstand) hinweg.....133
Abbildung 92: Einfluss- und Ergebnisgrößen für das System Harvester 134
Abbildung 93: Auswirkung der Veränderung der Kranreichweite des Harvesters auf die Anzahl nicht geernteter Bäume bei gleichzeitiger Erhöhung des Rückegassenabstandes von 20 m auf 40 m.....136
Abbildung 94: Auswirkung der Veränderung der Kranreichweite des Harvesters auf die tatsächlich geerntete Holzmenge bei gleichzeitiger Erhöhung des Rückegassenabstandes von 20 m auf 40 m.....138
Abbildung 95: Auswirkung der Veränderung der Kranreichweite des Harvesters auf die zurückgelegte Wegstrecke bei gleichzeitiger Erhöhung des Rückegassenabstandes von 20 m auf 40 m.....139
Abbildung 96: Auswirkung der Veränderung der Kranreichweite des Harvesters auf die Reine Arbeitszeit (RAZ), bei gleichzeitiger Erhöhung des Rückegassenabstandes von 20 m auf 40 m.....140
Abbildung 97: Auswirkung der Veränderung der Kranreichweite des Harvesters auf die Technische Arbeitsproduktivität (TAP) bei gleichzeitiger Erhöhung des Rückegassenabstandes von 20 m auf 40 m.....141
Abbildung 98: Auswirkung der Veränderung der Kranreichweite des Harvesters auf die Kosten pro Festmeter bei gleichzeitiger Erhöhung des Rückegassenabstandes von 20 m auf 40 m.....143
Abbildung 99: Auswirkung der Veränderung der Kranreichweite des Harvesters auf das Verhältnis der Zeitanteile für das Positionieren des Aggregats und das Befahren der Gassen und Wege an der RAZ bei gleichzeitiger Erhöhung des Rückegassenabstandes von 20 m auf 40 m 144
Abbildung 100: Auswirkung der Veränderung des Zeitgrades des Harvesters auf die Reine Arbeitszeit (RAZ), bei gleichzeitiger Erhöhung des Rückegassenabstandes von 20 m auf 40 m.....145
Abbildung 101: Auswirkung der Veränderung des Zeitgrades auf das Verhältnis der Zeitanteile für das Positionieren und das Fällen und Aufarbeiten sowie für das Befahren der Wege und Gassen an der RAZ bei gleichzeitiger Erhöhung des Rückegassenabstandes von 20 m auf 40 m 147
Abbildung 102: Auswirkung der Veränderung des Zeitgrades des Harvesters auf die Produktivität bei gleichzeitiger Erhöhung des Rückegassenabstandes von 20 m auf 40 m 148
Abbildung 103: Auswirkung der Veränderung des Zeitgrades des Harvesters auf die Kosten pro Festmeter bei gleichzeitiger Erhöhung des Rückegassenabstandes von 20 m auf 40 m.....149
Abbildung 104: Auswirkung der Veränderung des MAS-Anteils an der GAZ des Harvesters auf die Gesamtarbeitszeit (GAZ) bei gleichzeitiger Erhöhung des Rückegassenabstandes von 20 m auf 40 m.....151
Abbildung 105: Auswirkung der Veränderung des MAS-Anteils an der GAZ des Harvesters auf den Anteil der Allgemeinen Zeiten (AZ) an der Gesamtarbeitszeit (GAZ) bei gleichzeitiger Erhöhung des Rückegassenabstandes von 20 m auf 40 m 152
Abbildung 106: Auswirkung der Veränderung des MAS-Anteils an der GAZ des Harvesters auf die TAP bei gleichzeitiger Erhöhung des Rückegassenabstandes von 20 m auf 40 m.....153
Abbildung 107: Auswirkung der Veränderung des MAS-Anteils an der GAZ des Harvesters auf die TAP bei gleichzeitiger Erhöhung des Rückegassenabstandes von 20 m auf 40 m und zusätzlich erhöhter Erntebaumanzahl 154
Abbildung 108: Einfluss- und Ergebnisgrößen für das System Motormanuelle Holzernte.....155
Abbildung 109: Auswirkung der Veränderung der Anzahl von Arbeitern bei der Motormanuellen Holzernte auf die durchschnittliche Anzahl an Arbeitstagen bei einem Zeitgrad von 100 und gleichzeitiger Erhöhung des Rückegassenabstandes von 20 m auf 40 m 157
Abbildung 110: Auswirkung der Veränderung des Zeitgrades bei drei Waldarbeitern auf die geerntete Holzmenge pro Arbeiter bei gleichzeitiger Erhöhung des Rückegassenabstandes von 20 m auf 40 m.....158
Abbildung 111: Auswirkung der Veränderung des Zeitgrades bei drei Waldarbeitern auf die Technische Arbeitsproduktivität (TAP) pro Arbeiter bei gleichzeitiger Erhöhung des Rückegassenabstandes von 20 m auf 40 m.....159
Abbildung 112: Auswirkung der Veränderung des Zeitgrades bei drei Waldarbeitern auf die Kosten pro Festmeter pro Arbeiter bei gleichzeitiger Erhöhung des Rückegassenabstandes von 20 m auf 40 m 160
Abbildung 113: Einfluss- und Ergebnisgrößen für das System Forwarder 162

Abbildung 114: Auswirkung der Veränderung der Ladekapazität des Forwarders auf die Reine Arbeitszeit (RAZ) bei gleichzeitiger Erhöhung des Rückegassenabstandes von 20 m auf 40 m....163
Abbildung 115: Auswirkung der Veränderung der Ladekapazität des Forwarders auf die Reine Arbeitszeit (RAZ) bei gleichzeitiger Erhöhung des Rückegassenabstandes von 20 m auf 40 m und zusätzlich erhöhter Erntebaumanzahl....165
Abbildung 116: Auswirkung der Veränderung der Ladekapazität des Forwarders auf die Produktivität bei gleichzeitiger Erhöhung des Rückegassenabstandes von 20 m auf 40 m....166
Abbildung 117: Auswirkung der Veränderung der Ladekapazität des Forwarders auf die Kosten pro Festmeter bei gleichzeitiger Erhöhung des Rückegassenabstandes von 20 m auf 40 m....167
Abbildung 118: Auswirkung der Veränderung der Ladekapazität des Forwarders auf das Verhältnis des Zeitanteils für das Befahren der Gassen und Wege an der RAZ bei gleichzeitiger Erhöhung des Rückegassenabstandes von 20 m auf 40 m....168
Abbildung 119: Auswirkung der Veränderung des Zeitgrades des Forwarders auf die Reine Arbeitszeit (RAZ) bei gleichzeitiger Erhöhung des Rückegassenabstandes von 20 m auf 40 m....169
Abbildung 120: Auswirkung der Veränderung des Zeitgrades auf das Verhältnis der Zeitanteile für die Kranarbeit sowie für das Befahren der Wege und Gassen an der RAZ bei gleichzeitiger Erhöhung des Rückegassenabstandes von 20 m auf 40 m....170
Abbildung 121: Auswirkung der Veränderung des Zeitgrades des Forwarders auf die Produktivität bei gleichzeitiger Erhöhung des Rückegassenabstandes von 20 m auf 40 m....171
Abbildung 122: Auswirkung der Veränderung des Zeitgrades des Forwarders auf die Kosten pro Festmeter bei gleichzeitiger Erhöhung des Rückegassenabstandes von 20 m auf 40 m....172
Abbildung 123: Auswirkung der Veränderung des MAS-Anteils an der GAZ des Forwarders auf die Gesamtarbeitszeit (GAZ) bei gleichzeitiger Erhöhung des Rückegassenabstandes von 20 m auf 40 m....173
Abbildung 124: Auswirkung der Veränderung des MAS-Anteils an der GAZ des Forwarders auf den Anteil der Allgemeinen Zeiten (AZ) an der Gesamtarbeitszeit (GAZ) bei gleichzeitiger Erhöhung des Rückegassenabstandes von 20 m auf 40 m....174
Abbildung 125: Auswirkung der Veränderung des MAS-Anteils an der GAZ des Forwarders auf die TAP bei gleichzeitiger Erhöhung des Rückegassenabstandes von 20 m auf 40 m....175
Abbildung 126: Einfluss- und Ergebnisgrößen für das System Schlepper....176
Abbildung 127: Struktur der verschiedenen Arbeitsstrategien des Schleppers....177
Abbildung 128: Auswirkung der Veränderung des Zeitgrades des Schleppers auf die Reine Arbeitszeit (RAZ) bei gleichzeitiger Erhöhung des Rückegassenabstandes von 20 m auf 40 m (Strategie: Vorrücken im Bestand verteilter Abschnitte und Rücken aus dem Bestand)....180
Abbildung 129: Auswirkung der Veränderung des Zeitgrades des Schleppers auf die Technische Arbeitsproduktivität (TAP) bei gleichzeitiger Erhöhung des Rückegassenabstandes von 20 m auf 40 m (Strategie: Vorrücken im Bestand verstreuter Abschnitte + Rücken aus dem Bestand)....181
Abbildung 130: Auswirkung der Veränderung des Zeitgrades des Schleppers auf die Kosten pro Festmeter bei gleichzeitiger Erhöhung des Rückegassenabstandes von 20 m auf 40 m (Strategie: Vorrücken im Bestand verstreuter Abschnitte + Rücken aus dem Bestand)....182
Abbildung 131: Auswirkung der Veränderung der Arbeitsstrategie auf die Technische Arbeitsproduktivität (TAP) bei gleichzeitiger Veränderung des Zeitgrades (70, 100, 130) bei durchschnittlichen Rückegassenabständen von 20, 30 und 40 m....184
Abbildung 132: Auswirkung der Veränderung der Arbeitsstrategie auf die tatsächlich transportierte Holzmenge im Vergleich mit der tatsächlich geernteten Holzmenge bei gleichzeitiger Erhöhung des Rückegassenabstandes von 20 m auf 40 m....185
Abbildung 133: Auswirkung der Veränderung des Rückegassenabstandes von 20 m auf 40 m auf die Anzahl nicht durch den Schlepper vorgerückte Abschnitte aufgrund ihrer Positionierung zwischen 2,25 m und 3 m Abstand zur Gassenmitte....186
Abbildung 134: Darstellung der 0,75 m breiten Zone zwischen Gassengrenze und Ablagepunkten....187
Abbildung 135: Einfluss- und Ergebnisgrößen für das System Pferd....188
Abbildung 136: Auswirkung der Veränderung des Rückegassenabstandes von 20 m auf 40 m auf die Anzahl nicht durch das Pferd vorgerückter Abschnitte aufgrund zu hoher Einzelstückmasse (> 0,6 fm) (links) und Auswirkung der

Veränderung des Rückegassenabstandes von 20 m auf 40 m auf die Anzahl nicht durch das Pferd vorgerückter Abschnitte aufgrund der Positionierung zwischen 2,25 m und 3 m Abstand zur Gassenmitte (rechts).....191
Abbildung 137: Auswirkung der Veränderung des Zeitgrades des Pferdes auf die Reine Arbeitszeit (RAZ) bei gleichzeitiger Erhöhung des Rückegassenabstandes von 20 m auf 40 m.....192
Abbildung 138: Auswirkung der Veränderung des Zeitgrades des Pferdes auf die Technische Arbeitsproduktivität (TAP) bei gleichzeitiger Erhöhung des Rückegassenabstandes von 20 m auf 40 m.....193
Abbildung 139: Auswirkung der Veränderung des Zeitgrades des Pferdes auf die Kosten pro Festmeter bei gleichzeitiger Erhöhung des Rückegassenabstandes von 20 m auf 40 m.....194
Abbildung 140: Original-Erschließungssystem mit ausscheidendem Bestand (N = 1169).....199
Abbildung 141: (1) Original-Erschließungssystem inkl. Erntebäumen, die vom Harvester nicht erreicht werden können (schwarze Punkte), (2) Rot markierte Bereiche für den Einzug zusätzlicher Rückegassen, (3) Erweitertes Erschließungssystem vor Beginn der Holzernte inkl. Aufhieb, (4) Erweitertes Erschließungssystem mit rot markierten zusätzlichen Rückegassen nach dem Holzernteeingriff durch den Harvester (Kranreichweite 10 m) 207
Abbildung 142: Ausscheidender Bestand (links) und gesamter, aufstockender Bestand (rechts) im Durchschnittsalter von 45 Jahren 212
Abbildung 143: Ausscheidender Bestand (links) und gesamter, aufstockender Bestand (rechts) im Durchschnittsalter von 55 Jahren 214
Abbildung 144: Ausscheidender Bestand (links) und gesamter, aufstockender Bestand (rechts) im Durchschnittsalter von 65 Jahren 217
Abbildung 145: Ausscheidender Bestand (links) und gesamter, aufstockender Bestand (rechts) im Durchschnittsalter von 75 Jahren 219
Abbildung 146: Ausscheidender Bestand (links) und gesamter, aufstockender Bestand (rechts) im Durchschnittsalter von 85 Jahren 220
Abbildung 147: Vergleich der Anzahl an Bäumen des aufstockenden Bestandes und an Erntebäumen unter Einfluss der Anhebung des durchschnittlichen Bestandesalters von 45 auf 85 Jahre und der Variation der Eingriffsstärke 222
Abbildung 148: Vergleich des durchschnittlichen Brusthöhendurchmesser und der durchschnittlichen Höhen des aufstockenden Bestandes und der Erntebäume über den simulierten Entwicklungszeitraum von 40 Jahren hinweg 223
Abbildung 149: Anteil der Masse der einzelnen Sortimente an der gesamten geernteten Masse unter Einfluss der Anhebung des durchschnittlichen Bestandesalters von 45 auf 85 Jahre und der Variation der Eingriffsstärke (ES) 223
Abbildung 150: Veränderung der durchschnittlichen Stückmasse über die einzelnen Sortimente hinweg unter Einfluss der Anhebung des durchschnittlichen Bestandesalters von 45 auf 85 Jahre.....224
Abbildung 151: Veränderung der Holzerntekosten und der Technischen Arbeitsproduktivität [TAP] unter Einfluss der Anhebung des durchschnittlichen Bestandesalters von 45 auf 85 Jahre.....225
Abbildung 152: Abbildung der 4,5 ha großen Teilfläche des Testbestandes inkl. der Erntebäume in AutoMod 227
Abbildung 153: Efm m.R./h im Vergleich der Berechnungen der Formeln des Versuchs "Erstdurchforstung von Fichte mit einem PONSSE HS15" (RIEHLE, 1997) mit Berechnungen der Produktivitätsformeln des Modells nach PAUSCH (2004) (N = 367).....233
Abbildung 154: Efm m.R./h in Abhängigkeit des aufgearbeiteten Volumens jedes einzelnen Baumes im Vergleich des Versuchs "Zweitdurchforstung von Fichte mit einem TJ 1270A" (PAUSCH, 1999) mit Berechnungen der Produktivitätsformeln nach PAUSCH (2004) im Modell (N = 367).....233
Abbildung 155: Efm m.R./h in Abhängigkeit des aufgearbeiteten Volumens jedes einzelnen Baumes im Vergleich des Versuchs "Altdurchforstung von Fichte mit einem TJ 1270 A" (PAUSCH, 1999) mit Berechnungen der Produktivitätsformeln nach PAUSCH (2004) im Modell (N = 367).....234
Abbildung 156: Efm m.R./h in Abhängigkeit des aufgearbeiteten Volumens jedes einzelnen Baumes im Vergleich des Versuchs "Durchforstung von Fichte mit einem TJ 1270 A" (GUGLHÖR, 1995) mit Berechnungen der Produktivitätsformeln nach PAUSCH (2004) im Modell (N = 367).....235
Abbildung 157: Efm m.R./MAS in Abhängigkeit des aufgearbeiteten Volumens jedes einzelnen Baumes im Vergleich des Versuchs " Durchforstung von Fichte mit einem TJ 1270 A" (BOLLIN, 1998) mit Berechnungen der Produktivitätsformeln nach PAUSCH (2004) im Modell (N = 367).....235

Abbildung 158: Efm m.R./h in Abhängigkeit des aufgearbeiteten Volumens jedes einzelnen Baumes im Vergleich des Versuchs "Altdurchforstung von Fichte mit dem Starkholzharvester Hannibal" (FELLER, WEIXLER, PAUSCH, 1997) mit Berechnungen der Produktivitätsformeln nach PAUSCH (2004) im Modell (N = 367) 236
Abbildung 159: Textdatei "Allgemein.txt" 278
Abbildung 160: Textdatei "Harvester.txt" 278
Abbildung 161: Textdatei "Motormanuell.txt" 279
Abbildung 162: Textdatei "Forwarder.txt" 280
Abbildung 163: Textdatei "Schlepper.txt" 281
Abbildung 164: Textdatei "Pferd.txt" 282
Abbildung 165: Textdatei "Schichten.txt" 282
Abbildung 166: Textdatei "Pausen.txt" 282
Abbildung 167: Textdatei "Störungen.txt" 283
Abbildung 168: Textdatei "Harv_Gassenreihenfolge.txt" 283
Abbildung 169: Textdatei "Forw_Gassenreihenfolge.txt" 284
Abbildung 170: Textdatei "Baeume.txt" 284
Abbildung 171: Textdatei "Sortimente.txt" 285
Abbildung 172: Textdatei "Wege.txt" 286
Abbildung 173: Textdatei "Polter.txt" 286
Abbildung 174: Textdatei "EST?.txt" 286
Abbildung 175: Textdatei "EST_Zuschlaege.txt" 287
Abbildung 176: Textdatei "EST_Zuordnung.txt" 287
Abbildung 177: Formatierung der Tabelle des ausscheidenden Bestandes in MS Access für die Überführung der SILVA-Daten nach HOLZERNTE 302
Abbildung 178: Das HOLZERNTE-Menü M1 (Quelle: Software HOLZERNTE, FVA Baden-Württemberg) 303
Abbildung 179: Das HOLZERNTE-Menü M2 (Quelle: Software HOLZERNTE, FVA Baden-Württemberg) 303
Abbildung 180: Das HOLZERNTE-Menü M3 (Quelle: Software HOLZERNTE, FVA Baden-Württemberg) 304
Abbildung 181: Das HOLZERNTE-Menü M4 (Quelle: Software HOLZERNTE, FVA Baden-Württemberg) 304
Abbildung 182: Das Menü "Berechnen/Drucken" in HOLZERNTE (Quelle: Software HOLZERNTE, FVA Baden-Württemberg) 305
Abbildung 183: Ergebnisse der Berechnungen in HOLZERNTE (Quelle: Software HOLZERNTE, FVA Baden-Württemberg) 306
Abbildung 184: Berechnung von Hiebsserien in HOLZERNTE (Quelle: Software HOLZERNTE, FVA Baden-Württemberg) 307

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Fahrgeschwindigkeiten für die Systeme Harvester und Forwarder in Abhängigkeit des Erschließungssystems (Quelle: POHL, 2006) 18
Tabelle 2: Die fünf Arbeitssysteme des Holzerntemodells 72
Tabelle 3: Auswählbare Kombinationen der Arbeitssysteme (X = wählbar) 72
Tabelle 4: Erläuterungen zu den einstellbaren Systemparametern des Systems Harvester 74
Tabelle 5: Angaben zu den Formeln zur Berechnung der einzelnen Systemparameter 76
Tabelle 6: Erläuterungen zu den einstellbaren Systemparametern des Systems Motormanuelle Holzernte 83
Tabelle 7: Auszug aus Tabelle 2 des EST 84
Tabelle 8: Auszug aus der MS Access-Sortimentstabelle des Testbestandes 140 A1, eine Fichte 85
Tabelle 9: Lohnfaktoren für Motormanuelle Holzernte 90
Tabelle 10: Erläuterungen zu den einstellbaren Systemparametern des Systems Forwarder 97
Tabelle 11: Formeln zur Berechnung der einzelnen Systemparameter 99
Tabelle 12: Erläuterungen zu den einstellbaren Systemparametern des Systems Schlepper 105
Tabelle 13: Formeln zur Berechnung der einzelnen Systemparameter 107
Tabelle 14: Lohnfaktoren für das Rücken mit Schleppern 108
Tabelle 15: Erläuterungen zu den einstellbaren Systemparametern des Systems Rückepferd 112
Tabelle 16: Formeln zur Berechnung der einzelnen Systemparameter 113
Tabelle 17: Prozentwerte zur Aufschlüsselung der RAZ 114
Tabelle 18: Lohnfaktoren für das Vorrücken mit Pferden 114
Tabelle 19: Vergleich der aus den Formeln errechneten Werte, mit den tatsächlich im Modell verbrauchten Zeiten (Harvester) 121
Tabelle 20: Vergleich der Fahrgeschwindigkeiten (Harvester) 121
Tabelle 21: Vergleich der aus dem Tarif errechneten Werte, mit den tatsächlich im Modell verbrauchten Zeiten bei Änderung des Zeitgrades auf 50 % (Harvester) 121
Tabelle 22: Vergleich weiterer Parameter (Harvester) 122
Tabelle 23: Verhältnis RAZ:AZ bei Simulation der Ernte im Gesamtbestand (Harvester) 122
Tabelle 24: Vergleich der aus dem Tarif errechneten Werte, mit den tatsächlich im Modell verbrauchten Zeiten (Motormanuell) 122
Tabelle 25: Vergleich der aus dem Tarif errechneten Werte, mit den tatsächlich im Modell verbrauchten Zeiten (Motormanuell) 123
Tabelle 26: Vergleich der aus dem Tarif errechneten Werte, mit den tatsächlich im Modell verbrauchten Zeiten (Motormanuell) 123
Tabelle 27: Vergleich der aus dem Tarif errechneten Werte, mit den tatsächlich im Modell verbrauchten Zeiten bei Änderung des Zeitgrades auf 50 % (Motormanuell) 123
Tabelle 28: Vergleich weiterer Parameter (Motormanuell) 123
Tabelle 29: Vergleich der aus den Formeln errechneten Werte, mit den tatsächlich im Modell verbrauchten Zeiten (Forwarder) 124
Tabelle 30: Vergleich der Fahrgeschwindigkeiten (Forwarder) 124
Tabelle 31: Vergleich der aus dem Tarif errechneten Werte, mit den tatsächlich im Modell verbrauchten Zeiten bei Änderung des Zeitgrades auf 50 % (Forwarder) 124
Tabelle 32: Vergleich weiterer Parameter (Forwarder) 125
Tabelle 33: Verhältnis RAZ:AZ bei Simulation der Ernte im Gesamtbestand (Forwarder) 125
Tabelle 34: Vergleich der aus dem Tarif errechneten Werte, mit den tatsächlich im Modell verbrauchten Zeiten (Schlepper) 125
Tabelle 35: Vergleich der aus dem Tarif errechneten Werte, mit den tatsächlich im Modell verbrauchten Zeiten (Schlepper) 126
Tabelle 36: Vergleich der aus dem Tarif errechneten Werte, mit den tatsächlich im Modell verbrauchten Zeiten bei Änderung des Zeitgrades auf 50 % (Schlepper) 126

Tabelle 37: Vergleich weiterer Parameter (Schlepper) 126
Tabelle 38: Vergleich der aus dem Tarif errechneten Werte, mit den tatsächlich im Modell verbrauchten Zeiten (Schlepper) 127
Tabelle 39: Vergleich der aus dem Tarif errechneten Werte, mit den tatsächlich im Modell verbrauchten Zeiten (Schlepper) 127
Tabelle 40: Vergleich der aus dem Tarif errechneten Werte, mit den tatsächlich im Modell verbrauchten Zeiten bei Änderung des Zeitgrades auf 50 % (Schlepper) 127
Tabelle 41: Vergleich weiterer Parameter (Schlepper) 127
Tabelle 42: Vergleich der aus dem Tarif errechneten Werte, mit den tatsächlich im Modell verbrauchten Zeiten (Schlepper) 128
Tabelle 43: Vergleich der aus dem Tarif errechneten Werte, mit den tatsächlich im Modell verbrauchten Zeiten (Schlepper) 128
Tabelle 44: Vergleich der aus dem Tarif errechneten Werte, mit den tatsächlich im Modell verbrauchten Zeiten bei Änderung des Zeitgrades auf 50 % (Schlepper) 128
Tabelle 45: Vergleich weiterer Parameter (Schlepper) 128
Tabelle 46: Vergleich der aus dem Tarif errechneten Werte, mit den tatsächlich im Modell verbrauchten Zeiten (Pferd) 129
Tabelle 47: Vergleich der aus dem Tarif errechneten Werte, mit den tatsächlich im Modell verbrauchten Zeiten bei Änderung des Zeitgrades auf 50 % (Pferd) 129
Tabelle 48: Vergleich weiterer Parameter (Pferd) 129
Tabelle 49: Bestandeskennzahlen der drei unterschiedlichen Modelle 132
Tabelle 50: Anzahl der Erntebäume und der Bäume auf Forststraßen und Rückegassen 137
Tabelle 51: Erweiterte Anzahl an Erntebäumen zum Vergleich mit den Ergebnissen der ursprünglichen Bestände 154
Tabelle 52: Simulationsergebnisse Versuchsreihe 1 für das System Motormanuelle Holzernte 156
Tabelle 53: Erweiterte Anzahl an Erntebäumen zum Vergleich mit den Ergebnissen der ursprünglichen Bestände 164
Tabelle 54: Simulationsergebnisse der Versuche mit dem System Schlepper 178
Tabelle 55: Anzahl und Anteile der durch den Schlepper transportierten und nicht transportierten Holzmengen 186
Tabelle 56: Formeln zur Berechnung der Vorrückprozesse des Rückepferdes 189
Tabelle 57: Simulationsergebnisse der Versuche mit dem System Pferd 189
Tabelle 58: Anzahl und Anteile der durch das Pferd transportierten und nicht transportierten Holzmengen 190
Tabelle 59: Bestandeskennzahlen der vier unterschiedlichen Modelle 198
Tabelle 60: Anfallende Sortimente + durchschnittliche Stückmasse [fm] 200
Tabelle 61: Leistung und Kosten für die Systemkombination Harvester/Motormanuelle Holzernte/Schlepper/Forwarder in Abhängigkeit von vier verschiedenen Erschließungssystemen (grün = günstigste Variante) 201
Tabelle 62: Leistung und Kosten für die Systemkombination Harvester/Motormanuelle Holzernte/Pferd/Forwarder in Abhängigkeit von vier verschiedenen Erschließungssystemen (grün = günstigste Variante) 202
Tabelle 63: Leistung und Kosten für die Systemkombination Motormanuelle Holzernte/Schlepper/Forwarder in Abhängigkeit von vier verschiedenen Erschließungssystemen (grün = günstigste Variante) 202
Tabelle 64: Leistung und Kosten für die Systemkombination Motormanuelle Holzernte/Pferd/Forwarder in Abhängigkeit von vier verschiedenen Erschließungssystemen (grün = günstigste Variante) 203
Tabelle 65: Rangliste der Systemkombinationen 204
Tabelle 66: Leistung und Kosten für die Systemkombination Bagger-Harvester (Kranreichweite 13 m!)/Motormanuelle Holzernte/Schlepper/Forwarder in Abhängigkeit von vier verschiedenen Erschließungssystemen (grün = günstigste Variante) 205
Tabelle 67: Vergleich der Ergebniswerte der Harvester-Simulation im Testbestand mit Original- und erweitertem Erschließungssystem ohne und mit Einbeziehung des Aufhiebs der zusätzlichen Gassen 208
Tabelle 68: Bestandes- und Sortimentsinformationen für den Originalbestand mit einem Durchschnittsalter von 45 Jahren 212
Tabelle 69: Kosten, Leistung und erntekostenfreier Erlös für die Systemkombination Harvester/Motormanuelle Holzernte/Schlepper/Forwarder im Originalbestand mit einem durchschnittlichen Alter von 45 Jahren 213
Tabelle 70: Bestandes- und Sortimentsinformationen für den Originalbestand mit einem Durchschnittsalter von 55 Jahren 214
Tabelle 71: Kosten, Leistung und erntekostenfreier Erlös in €/fm für die Systemkombination Harvester/Motormanuelle Holzernte/Schlepper/Forwarder im Originalbestand mit einem durchschnittlichen Alter von 55 Jahren 215
Tabelle 72: Bestandes- und Sortimentsinformationen für den Originalbestand mit einem Durchschnittsalter von 65 Jahren 216

Tabelle 73: Kosten, Leistung und erntekostenfreier Erlös in €/fm für die Systemkombination Harvester/Motormanuelle Holzernte/Schlepper/Forwarder im Originalbestand mit einem durchschnittlichen Alter von 65 Jahren.....217
Tabelle 74: Bestandes- und Sortimentsinformationen für den Originalbestand mit einem Durchschnittsalter von 75 Jahren 218
Tabelle 75: Kosten, Leistung und erntekostenfreier Erlös in €/fm für die Systemkombination Harvester/Motormanuelle Holzernte/Schlepper/Forwarder im Originalbestand mit einem durchschnittlichen Alter von 75 Jahren.....219
Tabelle 76: Bestandes- und Sortimentsinformationen für den Originalbestand mit einem Durchschnittsalter von 85 Jahren 220
Tabelle 77: Kosten, Leistung und erntekostenfreier Erlös in €/fm für die Systemkombination Motormanuelle Holzernte/Schlepper im Originalbestand mit einem durchschnittlichen Alter von 85 Jahren 221
Tabelle 78: Stück- und Massenanteile der einzelnen Sortimente der durchgeführten Zeitstudie im Vergleich zu den in HOLZERNTE berechneten Werten 229
Tabelle 79: Gegenüberstellung der Harvester-Ergebnisse aus Zeitstudie und Simulation.....229
Tabelle 80: Gegenüberstellung der Harvester-Ergebnisse aus Zeitstudie und Simulation mit reduziertem Zeitgrad 42.....230
Tabelle 81: Übersicht über die für einen Leistungsvergleich ausgewählten Zeitstudien 231
Tabelle 82: Gegenüberstellung der Forwarder-Ergebnisse aus Zeitstudie und Simulation (Sortiment LPZ) 238
Tabelle 83: Gegenüberstellung der Forwarder-Ergebnisse aus Zeitstudie und Simulation (Sortiment IS).....238
Tabelle 84: Vergleich des von BRUCHNER 2004 entwickelten Basismodells mit den Eigenschaften des aktuell vorliegenden Modells (X = Eigenschaft im Modell vorhanden, --- = Eigenschaft nicht im Modell vorhanden) 242
Tabelle 85: Legende zu "Allgemein.txt" 278
Tabelle 86: Legende zu "Harvester.txt".....279
Tabelle 87: Legende zu "Motormanuell.txt" 279
Tabelle 88: Legende zu "Forwarder.txt".....280
Tabelle 89: Legende zu "Schlepper.txt" 281
Tabelle 90: Legende zu "Pferd.txt".....282
Tabelle 91: Legende zu "Schichten.txt" 282
Tabelle 92: Legende zu "Störungen.txt".....283
Tabelle 93: Legende zu Harv_Gassenreihenfolge.txt".....283
Tabelle 94: Legende zu "Forw_Gassenreihenfolge.txt" 284
Tabelle 95: Legende zu "Baeume.txt" 284
Tabelle 96: Legende zu "Sortimente.txt".....285
Tabelle 97: Legende zu "Wege.txt".....286
Tabelle 98: Legende zu "Polter.txt".....286
Tabelle 99: Legende zu "EST?.txt" 286
Tabelle 100: Legende zu "EST_Zuschlaege.txt".....287
Tabelle 101: Legende zu "EST_Zuordnung.txt".....287
Tabelle 102: Simulationsergebnisse Versuchsreihe 1 für das System Harvester.....288
Tabelle 103: Simulationsergebnisse Versuchsreihe 2 für das System Harvester.....290
Tabelle 104: Simulationsergebnisse Versuchsreihe 3 für das System Harvester.....291
Tabelle 105: Simulationsergebnisse Versuchsreihe 2 für das System Motormanuelle Holzernte.....293
Tabelle 106: Simulationsergebnisse Versuchsreihe 1 für das System Forwarder.....294
Tabelle 107: Simulationsergebnisse Versuchsreihe 2 für das System Forwarder.....296
Tabelle 108: Simulationsergebnisse Versuchsreihe 3 für das System Forwarder.....297

Anhang

Anhang I

Sind alle für die Modellierung des Bestandes und der Arbeitssysteme notwendigen Informationen in der Datenbank aggregiert, werden sie während der Kompilierung automatisch in einzelne Textdateien ausgegeben. Diese Textdateien werden dann für die Simulation eingelesen und ermöglichen somit die Initialisierung und den Ablauf des Modells. Die verschiedenen Textdateien sind im Folgenden aufgeführt:

Allgemein.txt

Harv	MM	Forw	Schlepp	Pferd	Entnahme
1	0	0	0	0	1

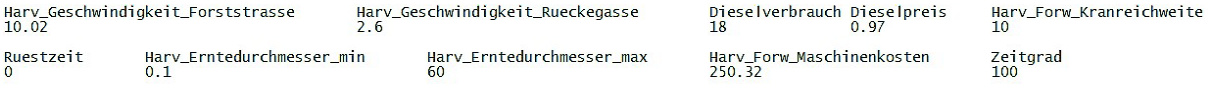
Simulationsname	Experimentname	anz1	Anz2	Anz3	anz4	Schlepp_LageSortimente
WAS Arnsberg	Versuch1	9685	1236	0	0	konzentriert

Abbildung 159: Textdatei "Allgemein.txt"

Tabelle 85: Legende zu "Allgemein.txt"

Harv = 1	Für den anstehenden Simulationslauf wurde der Harvester als einziges zu simulierendes Arbeitssystem ausgewählt.
MM = 0	Dieses Arbeitssystem wurde nicht für die Simulation ausgewählt.
Forw = 0	Dieses Arbeitssystem wurde nicht für die Simulation ausgewählt.
Schlepp = 0	Dieses Arbeitssystem wurde nicht für die Simulation ausgewählt.
Pferd = 0	Dieses Arbeitssystem wurde nicht für die Simulation ausgewählt.
Entnahme	Alle entsprechend in der Datenbank markierten Bäume werden durch den Harvester entnommen.
Simulationsname	Durch den Nutzer vergebener Name für die anstehende Simulationsreihe.
Experimentname	Durch den Nutzer vergebener Name für die einzelnen Versuche der Simulationsreihe.
anz1	Anzahl aller Bäume auf der Bestandesfläche.
Anz2	Anzahl aller Bäume, die durch den Harvester entnommen werden.
Anz3	Platzhalter für weitere Werte.
anz4	Platzhalter für weitere Werte.
Schlepp_LageSortimente = konzentriert	Lage der Sortimente nach der Aufarbeitung der Erntebäume. Da in diesem Fall der Harvester die Bäume erntet, werden die Abschnitte an den Rückegassen und Forststraßen konzentriert abgelegt.

Harvester.txt



Harv_Geschwindigkeit_Forststrasse	Harv_Geschwindigkeit_Rueckegasse	Dieselverbrauch	Dieselpreis	Harv_Forw_Kranreichweite
10.02	2.6	18	0.97	10

Ruestzeit	Harv_Erntedurchmesser_min	Harv_Erntedurchmesser_max	Harv_Forw_Maschinenkosten	Zeitgrad
0	0.1	60	250.32	100

Abbildung 160: Textdatei "Harvester.txt"

Tabelle 86: Legende zu "Harvester.txt"

Harv_Geschwindigkeit_Forststraße = 10.02	Geschwindigkeit der Maschine auf der Forststraße.
Harv_geschwindigkeit_Rueckegasse = 2.6	Geschwindigkeit der Maschine auf der Rückegasse.
Dieselverbrauch = 18	Dieselverbrauch der Maschine pro MAS15.
Dieselpreis = 0.97	Dieselpreis, mit dem die Fahrtkosten berechnet werden.
Harv_Forw_Kranreichweite = 10	Reichweite des Krans, in diesem Fall beim Harvester.
Ruestzeit = 0	Dauer der Ruestzeit beim Harvester.
Harv_Erntedurchmesser_min = 0.1	Minimaler Ernte-BHD des Harvesters.
Harv_Erntedurchmesser_max = 60	Maximaler Ernte-BHD des Harvesters.
Harv_Forw_Maschinenkosten = 250.32	Maschinenkosten pro MAS15.
Zeitgrad = 100	Zeitgrad für die Simulation des Harvesterfahrers.

Motormanuell.txt

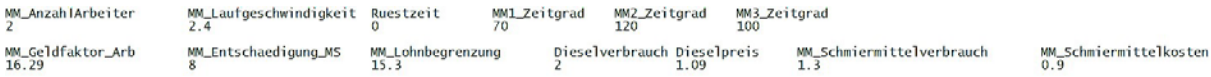


Abbildung 161: Textdatei "Motormanuell.txt"

Tabelle 87: Legende zu "Motormanuell.txt"

MM_AnzahlArbeiter = 2	Anzahl der eingesetzten Waldarbeiter.
MM-Laufgeschwindigkeit = 2.4	Laufgeschwindigkeit der Waldarbeiter im Bestand. Dieser Wert ist nicht durch den Nutzer veränderbar.
Ruestzeit = 0	Dauer der Ruestzeit bei den Waldarbeitern.
MM1_Zeitgrad = 70	Zeitgrad für Waldarbeiter 1.
MM2_Zeitgrad = 120	Zeitgrad für Waldarbeiter 2.
MM3_Zeitgrad = 100	Zeitgrad für Waldarbeiter 3.
MM_Geldfaktor_Arbeit = 16.29	Geldfaktor für die Berechnung des Lohnes für die geleistete Arbeit der Waldarbeiter.
MM_Entschädigung_MS = 8	Faktor für die Berechnung der Entschädigung für die Motorsäge.
MM_Lohnbegrenzung = 15.30	Lohnbegrenzung für die Waldarbeiter.
Dieselverbrauch = 2	Dieselverbrauch der Motorsäge pro MAS15.
Dieselpreis = 0.97	Dieselpreis, mit dem die Verbrauchskosten berechnet werden.
MM_Schmiermittelverbrauch = 1.3	Schmiermittelverbrauch der Motorsäge pro MAS15.
MM_Schmiermittelkosten = 0.9	Schmiermittelpreis, mit dem die Verbrauchskosten berechnet werden.

Forwarder.txt

```
Forw_Schlepp_Fahrgeschwindigkeit_Forststrasse_unbeladen  Forw_Schlepp_Fahrgeschwindigkeit_Forststrasse_beladen  Forw_Schlepp_Fahrgeschwindigkeit_Rückegasse_unbeladen
7.8                                                      6.8                                                    4.1
Forw_Schlepp_Fahrgeschwindigkeit_Rückegasse_beladen  Forw_Fahrgeschwindigkeit_Arbeitsfahrt  Forw_Ladekapazitaet  Harv_Forw_Maschinenkosten
3.9                                                  3                                     10                   120
Dieselverbrauch  Dieselpreis  Harv_Forw_Kranreichweite  Ruestzeit  Forw_Schlepp_ZangenKapazitaet  Zeitgrad
13               0.97         10                       0          0.75                           100
```

Abbildung 162: Textdatei "Forwarder.txt"

Tabelle 88: Legende zu "Forwarder.txt"

Forw_Schlepp_FahrgeschwindigkeitForststraße_unbeladen = 7.8	Fahrgeschwindigkeit des Forwarders unbeladen auf der Forststraße.
Forw_Schlepp_FahrgeschwindigkeitForststraße_beladen = 6.1	Fahrgeschwindigkeit des Forwarders beladen auf der Forststraße.
Forw_Schlepp_FahrgeschwindigkeitRückegasse_unbeladen = 4.1	Fahrgeschwindigkeit des Forwarders unbeladen auf der Rückegasse.
Forw_Schlepp_FahrgeschwindigkeitRückegasse_beladen = 3.9	Fahrgeschwindigkeit des Forwarders beladen auf der Rückegasse.
Forw_FahrgeschwindigkeitArbeitsfahrt = 3	Fahrgeschwindigkeit des Forwarders während der Arbeitsfahrt.
Forw_Ladekapazität = 10	Ladekapazität des Forwarders.
Harv_Forw_Maschinenkosten = 120	Maschinenkosten pro MAS15.
Dieselverbrauch = 13	Dieselverbrauch der Maschine pro MAS15.
Dieselpreis = 0.97	Dieselpreis, mit dem die Fahrtkosten berechnet werden.
Harv_Forw_Kranreichweite = 10	Reichweite des Krans, in diesem Fall beim Forwarder.
Ruestzeit = 0	Dauer der Ruestzeit beim Forwarder.
Forw_Schlepp_ZangenKapazitaet = 0.75	Kapazität der Forwarder-Zange beim Greifen der Abschnitte.
Zeitgrad = 100	Zeitgrad für die Simulation des Forwarderfahrers.

Schlepper.txt

Abbildung 163: Textdatei "Schlepper.txt"

Tabelle 89: Legende zu "Schlepper.txt"

Forw_Schlepp_FahrgeschwindigkeitForststraße_unbeladen = 7.8	Fahrgeschwindigkeit des Schleppers unbeladen auf der Forststraße. Dieser Wert ist nicht durch den Nutzer änderbar.
Forw_Schlepp_FahrgeschwindigkeitForststraße_beladen = 6.1	Fahrgeschwindigkeit des Schleppers beladen auf der Forststraße. Dieser Wert ist nicht durch den Nutzer änderbar.
Forw_Schlepp_FahrgeschwindigkeitRückegasse_unbeladen = 4.1	Fahrgeschwindigkeit des Schleppers unbeladen auf der Rückegasse. Dieser Wert ist nicht durch den Nutzer änderbar.
Forw_Schlepp_FahrgeschwindigkeitRückegasse_beladen = 3.9	Fahrgeschwindigkeit des Schleppers beladen auf der Rückegasse. Dieser Wert ist nicht durch den Nutzer änderbar.
Dieselverbrauch = 10	Dieselverbrauch der Maschine pro MAS15.
Dieselpreis = 0.97	Dieselpreis, mit dem die Fahrtkosten berechnet werden.
Ruestzeit = 0	Dauer der Ruestzeit beim Schlepper.
Forw_Schlepp_ZangenKapazitaet = 0.75	Kapazität der Schlepper-Zange beim Greifen der Abschnitte.
Zeitgrad = 100	Zeitgrad für die Simulation des Schlepperfahrers.
Schlepp_Strategie = vorruecken	Arbeitsstrategie des Schleppers.
Schlepp_LageSortimente = konzentriert	Lage der Stämme und Stammabschnitte vor Beginn der Arbeit des Schleppers.
Schlepp_Bestandesschaeden = 0	Zuschlag auf die Arbeitszeit des Schleppers für etwaig verursachte Schäden am Bestand.
Harv_Forw_Maschinenkosten = 70	Maschinenkosten pro MAS15.

Pferd.txt

Pferd_Geschwindigkeit_Last	Pferd_Geschwindigkeit_ohne_Last	Ruestzeit	Pferd_Kapazitaet	Zeitgrad	Harv_Forw_Maschinenkosten
3.6	3.6	0	0.6	100	45.15

Abbildung 164: Textdatei "Pferd.txt"

Tabelle 90: Legende zu "Pferd.txt"

Pferd_Geschwindigkeit_Last = 3.6	Laufgeschwindigkeit des Pferdes beladen im Bestand. Dieser Wert ist nicht durch den Nutzer änderbar.
Pferd_Geschwindigkeit_ohne_Last = 3.6	Laufgeschwindigkeit des Pferdes unbeladen im Bestand. Dieser Wert ist nicht durch den Nutzer änderbar.
Ruestzeit = 0	Dauer der Rüstzeit beim Pferd.
Pferd_Kapazitaet = 0.6	Zugkapazität des Pferdes bei der Arbeit.
Zeitgrad = 100	Zeitgrad für die Simulation des Pferdeführers.
Harv_Forw_Maschinenkosten = 45.15	Systemkosten pro MAS15.

Schichten.txt

ResourcePtr	LabelPtr	Beginn	Dauer
R_Harvester	Labels.Harv_Label	0	660
R_Forwarder	Labels.Forw_Label	2000	660
R_Pferd	Labels.Pferd_Label	0	660
R_MM	Labels.MM_Label	0	660
R_Schlepper	Labels.Schlepper_Label	0	660

Abbildung 165: Textdatei "Schichten.txt"

Tabelle 91: Legende zu "Schichten.txt"

ResourcePtr	Name der entsprechenden Ressource also des entsprechenden Arbeitssystems.
LabelPtr	Name des zu einer Ressource dazugehörigen Labels.
Beginn	Startzeit der Schicht in Minuten nach Beginn der Simulation.
Dauer	Dauer einer Schicht.

Pausen.txt

ResourcePtr	LabelPtr	Beginn	Dauer
R_Harvester	Labels.Harv_Label	300	30
R_Forwarder	Labels.Forw_Label	600	30

Abbildung 166: Textdatei "Pausen.txt"

Pausenzeiten sind nur für die Arbeitssysteme Harvester und Forwarder einstellbar. Den anderen drei Systemen hinterliegen Tarife mit integrierten Pausenzeiten.

Störungen.txt

ResourcePtr	LabelPtr	RWS_min	RWS_mean	RWS_max	WUS_min	WUS_mean	WUS_max	AFS_min	AFS_mean	AFS_max	SchichtAnfang	SchichtLaenge	MAS	RWS	WUS	AFS
R_Pferd	Labels.Pferd_Label	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	660	100	0	0	0
R_Harvester	Labels.Harv_Label	54	186	498	48	60	84	48	66	120	0	660	70	89	0	11
R_MM	Labels.MM_Label	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	660	100		0	0
R_Forwarder	Labels.Forw_Label	30	102	302	48	60	78	36	54	84	2000	660	83	85.7194226		14.28
R_Schlepper	Labels.Schlepper_Label	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	660	100	0	0	0

Abbildung 167: Textdatei "Störungen.txt"

Tabelle 92: Legende zu "Störungen.txt"

ResourcePtr	Name der entsprechenden Ressource also des entsprechenden Arbeitssystems.
LabelPtr	Name des zu einer Ressource dazugehörigen Labels.
RWS_min	Minimaler Wert für Reparatur- und Wartungsstunden.
RWS_mean	Wahrscheinlichster Wert für Reparatur- und Wartungsstunden.
RWS_max	Maximaler Wert für Reparatur- und Wartungsstunden.
WUS_min	Minimaler Wert für Wege- und Umsetzstunden.
WUS_mean	Wahrscheinlichster Wert für Wege- und Umsetzstunden.
WUS_max	Maximaler Wert für Wege- und Umsetzstunden.
AFS_min	Minimaler Wert für sonstige Ausfallstunden.
AFS_mean	Wahrscheinlichster Wert für sonstige Ausfallstunden.
AFS_max	Maximaler Wert für sonstige Ausfallstunden.
SchichtAnfang	Beginn einer Schicht.
SchichtLaenge	Dauer einer Schicht.
MAS	Prozentanteil der Maschinenarbeitsstunden (MAS) an der Gesamtarbeitszeit (GAZ).
RWS	Prozentanteil der Reparatur- und Wartungsstunden (RWS) an den Maschinenarbeitsstunden (MAS).
WUS	Prozentanteil der Wege- und Umsetzstunden (WUS) an den Maschinenarbeitsstunden (MAS).
AFS	Prozentanteil der sonstigen Ausfallstunden (AFS) an den Maschinenarbeitsstunden (MAS).

Harv_Gassenreihenfolge.txt

Reihenfolge	sectionName	AnzahlvonBaumID
1	hauptweg1	1
2	rueckeGasse36	3
5	rueckeGasse37	5
7	hauptweg3	3
8	rueckeGasse38	11
9	rueckeGasse33	1
10	rueckeGasse32	3
...	...	...

Abbildung 168: Textdatei "Harv_Gassenreihenfolge.txt"

Tabelle 93: Legende zu Harv_Gassenreihenfolge.txt"

Reihenfolge	Reihenfolge der durch den Harvester zu befahrenden Rückegassen- und Forststraßenabschnitte.
sectionName	Name des jeweiligen Abschnitts im AutoMod Quellcode.
Anzahlvon BaumID	Anzahl der Bäume, die in diesem Wegbereich entnommen werden sollen.

Forw_Gassenreihenfolge.txt

```
Reihenfolge     sectionName
1               hauptweg1
2               rueckeGasse36
3               rueckeGasse35
4               rueckeGasse34
5               rueckeGasse37
6               hauptweg2
7               hauptweg3
8               rueckeGasse38
9               rueckeGasse33
10              rueckeGasse32
...             ...
```

Abbildung 169: Textdatei "Forw_Gassenreihenfolge.txt"

Tabelle 94: Legende zu "Forw_Gassenreihenfolge.txt"

Reihenfolge	Reihenfolge der durch den Forwarder zu befahrenden Rückegassen- und Forststraßenabschnitte.
sectionName	Name des jeweiligen Abschnitts im AutoMod Quellcode.

Baeume.txt

```
Baum-Nummer     Abteilung       Baumart BHD     Hoehe   X-Koordinate    Y-Koordinate    Z-Koordinate
1               A1              1       15.8    15.5    -72.3           480.8           0
1               A1              1       15.8    15.5    226.3           326.8           0

Entnahme        Quadrant        AufForstweg     AufRueckegasse  EntfernungGasse BezugsGasse
0               22              0               0               0               <keine>
0               11              0               0               0               <keine>

Anzeigen        ControlPoint    CPX     CPY     CPZ     ZuordnungErfolgt        AblageX AblageY AblageZ AblageRotation
0               <keine>         0       0       0       0                       0       0       0       0
0               <keine>         0       0       0       0                       0       0       0       0
```

Abbildung 170: Textdatei "Baeume.txt"

Tabelle 95: Legende zu "Baeume.txt"

Baum-Nummer	Nummer des jeweiligen Baumes. In diesem Fall gibt es zwei Bäume mit der Nummer „1“, da sie unterschiedlichen Quadranten angehören.
Abteilung	Bezeichnung derjenigen Abteilung, in der sich dieser Baum befindet.
Baumart	Codierung der Baumart aus HOLZERNTE.
BHD	BHD des entsprechenden Baumes.
Hoehe	Höhe des entsprechenden Baumes.
X-, Y-, Z-Koordinate	Positionskoordinaten des jeweiligen Baumes, umgerechnet auf das lokale Koordinatensystem des Modells. Eine Z-Koordinate wurde bisher noch nicht vergeben.
Entnahme	Angabe darüber, ob dieser Baum entnommen wird (0 = Keine Entnahme, 1 = Entnahme).
Quadrant	Nummer des Quadranten, zu dem dieser Baum gehört.
AufForstweg	Aussage darüber, ob sich der Baum auf einem Forstweg befindet. Ist dies der Fall, wird er automatisch nicht angezeigt, da Forstwege und Rückegassen nicht bewaldet sein sollen.
AufRueckegasse	Aussage darüber, ob sich der Baum auf einer Rückegasse befindet. Ist dies der Fall, wird er automatisch nicht angezeigt, da Forstwege und Rückegassen nicht bewaldet sein sollen.
EntfernungGasse	Entfernung vom Baum zum nächsten Kontrollpunkt auf der Gasse.
BezugsGasse	Im Falle einer anstehenden Ernte, wird für diesen Baum der Forstweg oder die Rückegasse bestimmt, von dem bzw. von der er gefällt werden wird. Dabei gilt wieder der am nächsten liegende Kontrollpunkt als Auswahlkriterium.
Anzeigen	Aussage darüber, ob dieser Baum bei der graphischen Darstellung angezeigt werden soll (0 = Keine Anzeige, 1 = Anzeige).
ControlPoint	Bezeichnung des ausgewählten Kontrollpunktes, wenn der entsprechende Baum zur Ernte ansteht.
CPX, CPY, CPZ	X-, Y- und Z-Koordinate des ausgewählten Kontrollpunktes.

ZuordnungErfolgt	Aussage darüber, ob der Baum im Erntefall einem Kontrollpunkt zugeordnet wurde.
AblageX, ***AblageY,*** ***AblageZ***	X-, Y- und Z-Koordinate des Ablagepunktes der Sortimente nach der Ernte an der entsprechenden Forststraße oder Rückegasse.
AblageRotation	Rotationswinkel, der notwendig ist, um die Sortimente in der graphischen Darstellung senkrecht zur jeweiligen Forststraße oder Rückegasse zu platzieren.

Sortimente.txt

Baum_Nr	Ausdr1	Abteilung	SortenGruppeNr	Volumenfaktor	Los_Nr	HKS_Sorte_Nr	HKS_Sorte	HKS_Klasse
9	1	A2	1	70	1	1	STH	L3a
9	1	A2	1	70	1	1	STH	L2b
9	1	A2	1	70	1	1	STH	L2a

HKS_Guete_Nr	HKS_Guete	BHD	Hoehe	Mdm	Laenge	Volum_mR	Volum_oR
4	B	43	27	34.89844512	6	0.63736176	0.57392257
4	B	43	27	29.47252655	6	0.4598751	0.40933215
4	B	43	27	23.48393249	6	0.29344025	0.25988593

Abbildung 171: Textdatei "Sortimente.txt"

Tabelle 96: Legende zu "Sortimente.txt"

Baum_Nr	Nummer des jeweiligen Baumes, dem diese drei Sortimente zugeordnet werden. In diesem Fall wurden jedem Baum mit der Nummer „9“, den es ja in jedem Quadranten einmal gibt, diese Sortimente zugeordnet.
Ausdr1	Baumart
Abteilung	Bezeichnung derjenigen Abteilung, in der sich diese Bäume befinden.
SortenGruppenNr	Nummer der Sortengruppe, der diese Sortimente zugeordnet werden. Diese Information ist für die Einstellung der Rückestrategie des Forwarders notwendig.
Volumfaktor	Faktor, der auf das Volumen mit Rinde der einzelnen Sortimentsabschnitte angewendet wird. Diese Information ist für eine korrekte Beladung des Forwarders notwendig.
Los_Nr	Information aus HOLZERNTE. Nummer des Loses, zu dem diese Abschnitte gehören. Die Lose können in HOLZERNTE frei definiert werden.
HKS_Sorte_Nr	Information aus HOLZERNTE. Nummer der Sorte, zu der diese Abschnitte gehören.
HKS_Sorte	Information aus HOLZERNTE. Festgelegte Sortenbezeichnung des Abschnittes nach der Handelsklassensortierung (HKS).
HKS_Klasse	Information aus HOLZERNTE. Stärkeklasse, die den Abschnitten nach der Mittenstärkensortierung der HKS zugeordnet wurde.
HKS_Guete_Nr	Information aus HOLZERNTE. Nummer der Güteklasse, der diese Abschnitte zugeordnet wurden.
HKS-Guete	Information aus HOLZERNTE. Festgelegte Gütebezeichnung des Abschnittes nach der Handelsklassensortierung (HKS).
BHD	BHD des Baumes, dem diese Abschnitte zugeordnet wurden. Verknüpfungsgröße bei der Zusammenführung von Einzelbaum- und Sortimentsdaten!
Hoehe	Höhe des Baumes, dem diese Abschnitte zugeordnet wurden. Verknüpfungsgröße bei der Zusammenführung von Einzelbaum- und Sortimentsdaten!
Mdm	Mittendurchmesser der einzelnen Sortimentsabschnitte.
Laenge	Länge der einzelnen Sortimentsabschnitte.
Volumen_mR	Volumen mit Rinde der einzelnen Sortimentsabschnitte.
Volumen_oR	Volumen ohne Rinde der einzelnen Sortimentsabschnitte.

Wege.txt

gpath	centerX	centerY	centerZ	rotationX	rotationY	rotationZ	scaleX	scaleY	scaleZ	forststrasse
hauptweg1	11.23749999	26.648	0	0	0	67.13477708	57.8410688	4.5	0.02	1
hauptweg2	26.21649999	61.386	0	0	0	65.18018795	17.8266006	4.5	0.02	1
hauptweg3	38.55899999	87.089	0	0	0	63.97224033	39.20178414	4.5	0.02	1
rueckeGasse13	217.37899999	617.036	0	0	0	190.21969424	61.26600473	4.5	0.02	0
rueckeGasse14	174.24449999	607.6405	0	0	0	196.95893099	27.15589928	4.5	0.02	0
rueckeGasse15	150.09499999	600.417	0	0	0	196.29528427	23.25832435	4.5	0.02	0

Abbildung 172: Textdatei "Wege.txt"

Tabelle 97: Legende zu "Wege.txt"

gpath	Klassifizierung der Forststraßen bzw. Rückegassen.
centerX, ***centerY,*** ***centerZ***	X-, Y-, Z-Koordinate des Mittelpunktes des Wegobjekts.
rotationX, ***rotationY,*** ***roationZ***	X-, Y-, Z-Rotation des Wegobjekts.
scaleX, ***scaleY,*** ***scaleZ***	X-, Y-, Z-Skalierung des Wegobjekts.
forststraße	Handelt es sich bei diesem Weg um eine Forststraße?

Polter.txt

PolterNr	Name	atkiv
3	path_mov_dtl:Holzlager_nordost	1
4	path_mov_dtl:Holzlager_nord	1
1	path_mov_dtl:Holzlager_sued	1
2	path_mov_dtl:Holzlager_suedost	0

Abbildung 173: Textdatei "Polter.txt"

Tabelle 98: Legende zu "Polter.txt"

PolterNr	Jedes im Modell platzierte Polter erhält eine eigene Nummer.
Name	Im Quellcode der Software definierter Name der einzelnen Polter.
aktiv	Anzeige, welche Polter durch den Nutzer aktiviert worden sind und welche nicht (1 = aktiv, 0 = inaktiv).

EST?.txt

Sorte	Baumart	vonDM	bisDM	Arb	MS
IL	1	8	9	221	88
IL	1	9	10	161	62
IL	1	10	11	119	47
IL	1	11	12	97	38
IL	1	12	13	81	32

Abbildung 174: Textdatei "EST?.txt"

Tabelle 99: Legende zu "EST?.txt"

Sorte	Nach HKS (Handelsklassensortierung) definierte Sorte, auf die sich die entsprechenden, in dieser Tabelle aufgeführten Arbeitszeiten beziehen.
Baumart	Codierung der Baumart nach HKS (1 = Fichte).
vonDM…bisDM	Definition der Durchmesserstufen, auf die sich die jeweiligen Arbeitszeiten beziehen.
Arb	Im EST (Erweiterter Sortentarif) festgelegte und im Modell eingesetzte Arbeitszeit für das Aufarbeiten eines entsprechenden Abschnittes.
MS	Motorsägenzeit, die für das Aufarbeiten eines entsprechenden Abschnittes im EST berechnet wird. Dieser Wert wird nur zur Berechnung der Motorsägenentschädigung bei der Verlohnung verwendet.

EST_Zuschlaege.txt

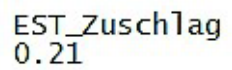


Abbildung 175: Textdatei "EST_Zuschlaege.txt"

Tabelle 100: Legende zu "EST_Zuschlaege.txt"

EST_Zuschlag	Im Frontend durch den Nutzer berechneter Zuschlagswert, anwendbar auf die Arbeitszeit der Waldarbeiter.

EST_Zuordnung.txt

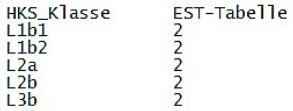


Abbildung 176: Textdatei "EST_Zuordnung.txt"

Tabelle 101: Legende zu "EST_Zuordnung.txt"

HKS_Klasse	Nach HKS definierte Stärkeklassen der einzelnen Sortimentsabschnitte.
EST-Tabelle	Zuordnung einer EST-Tabelle zu den einzelnen Stärkeklassen. Diese Zuordnung übernimmt der Nutzer im Verlauf der Voreinstellungen im Frontend.

Alle weiteren Informationen über die Berechnungen auf Basis des Erweiterten Sortentarifs (EST) sind in Kapitel 5.6.2 nachzulesen.

Anhang II

Tabelle 102: Simulationsergebnisse Versuchsreihe 1 für das System Harvester

	20 m RG-Abstand	30 m RG-Abstand	40 m RG-Abstand
Anzahl zu entnehmender Bäume [Stk]	**1085**	**1190**	**1245**
Tastsächlich entnommen [Stk] **(Kranreichweite 7 m)**	696	480	391
Außer Reichweite [Stk]	389	710	854
Anteil "Positionieren" an RAZ [%]	33.2	32.8	32
Anteil "Fahrzeiten" an RAZ [%]	27.1	28.1	29.1
Geerntete Holzmenge [fm]	323.9	223.4	187.7
Nicht geerntete Holzmenge [fm]	184.8	335	396.3
MAS [h]	12	8.4	7
TAP [fm/MAS]	26.9	26.6	26.8
Zurückgelegte Wegstrecke [km]	7.8	5.9	5.3
Fm-Kosten [€/fm]	6	6.11	6
Tastsächlich entnommen [Stk] **(Kranreichweite 8 m)**	809	573	447
Außer Reichweite [Stk]	276	617	798
Anteil "Positionieren" an RAZ [%]	34.4	34	33.1
Anteil "Fahrzeiten" an RAZ [%]	24.6	25.4	26.9
Geerntete Holzmenge [fm]	372	265.1	212.2
Nicht geerntete Holzmenge [fm]	136.7	293.3	371.8
MAS [h]	13.5	9.7	7.8
TAP [fm/MAS]	27.6	27.4	27.3
Zurückgelegte Wegstrecke [km]	7.9	6	5.3
Fm-Kosten [€/fm]	5.89	5.91	5.93
Tastsächlich entnommen [Stk] **(Kranreichweite 9 m)**	948	653	535
Außer Reichweite [Stk]	137	537	710
Anteil "Positionieren" an RAZ [%]	35.4	34.8	34.4
Anteil "Fahrzeiten" an RAZ [%]	22.2	23.4	24.1
Geerntete Holzmenge [fm]	441.3	306	257.6
Nicht geerntete Holzmenge [fm]	67.4	252.4	326.4
MAS [h]	15.4	10.7	9
TAP [fm/MAS]	28.8	28.5	28.7
Zurückgelegte Wegstrecke [km]	7.9	6	5.4
Fm-Kosten [€/fm]	5.64	5.69	5.66
Tastsächlich entnommen [Stk] **(Kranreichweite 10 m)**	1085	750	611
Außer Reichweite [Stk]	0	440	634
Anteil "Positionieren" an RAZ [%]	36.1	35.8	35.1
Anteil "Fahrzeiten" an RAZ [%]	20.3	21.3	22
Geerntete Holzmenge [fm]	508.7	353.7	296.6
Nicht geerntete Holzmenge [fm]	0	204.7	287.4
MAS [h]	17.2	12.1	10
TAP [fm/MAS]	29.7	29.3	29.7
Zurückgelegte Wegstrecke [km]	7.9	6.1	5.4
Fm-Kosten [€/fm]	5.47	5.53	5.5

Tastsächlich entnommen [Stk] **(Kranreichweite 11 m)**	1085	838	689
Außer Reichweite [Stk]	0	352	556
Anteil "Positionieren" an RAZ [%]	36.1	36.3	35.9
Anteil "Fahrzeiten" an RAZ [%]	20.3	19.8	20.2
Geerntete Holzmenge [fm]	508.7	396.4	334
Nicht geerntete Holzmenge [fm]	0	162	250
MAS [h]	17.2	13.2	11
TAP [fm/MAS]	29.7	30	30.4
Zurückgelegte Wegstrecke [km]	7.9	6.1	5.5
Fm-Kosten [€/fm]	5.47	5.41	5.34
Tastsächlich entnommen [Stk] **(Kranreichweite 12 m)**	1085	939	754
Außer Reichweite [Stk]	0	251	491
Anteil "Positionieren" an RAZ [%]	36.1	36.9	36.4
Anteil "Fahrzeiten" an RAZ [%]	20.3	18.4	19.2
Geerntete Holzmenge [fm]	508.7	444.7	366.3
Nicht geerntete Holzmenge [fm]	0	113.7	217.7
MAS [h]	17.2	14.6	11.9
TAP [fm/MAS]	29.7	30.5	30.8
Zurückgelegte Wegstrecke [km]	7.9	6.1	5.5
Fm-Kosten [€/fm]	5.47	5.31	5.27
Tastsächlich entnommen [Stk] **(Kranreichweite 13 m)**	1085	1021	813
Außer Reichweite [Stk]	0	169	432
Anteil "Positionieren" an RAZ [%]	36.1	37.3	36.8
Anteil "Fahrzeiten" an RAZ [%]	20.3	17.4	18.4
Geerntete Holzmenge [fm]	508.7	481.6	392.4
Nicht geerntete Holzmenge [fm]	0	76.8	191.6
MAS [h]	17.2	15.6	12.7
TAP [fm/MAS]	29.7	30.9	31
Zurückgelegte Wegstrecke [km]	7.9	6.1	5.5
Fm-Kosten [€/fm]	5.47	5.25	5.24

Anhang III

Tabelle 103: Simulationsergebnisse Versuchsreihe 2 für das System Harvester

	20 m RG-Abstand	30 m RG-Abstand	40 m RG-Abstand
Anzahl zu entnehmender Bäume [Stk]	**1085**	**1190**	**1245**
Tastsächlich entnommen [Stk] **(Zeitgrad 70)**	1085	750	611
Tastsächlich entnommen [%] **(Zeitgrad 70)**	100	63	49.1
Außer Reichweite [Stk]	0	440	634
Anteil "Positionieren" an RAZ [%]	37.9	37.7	37.1
Anteil "Fahrzeiten" an RAZ [%]	16.4	17.2	17.7
Geerntete Holzmenge [fm]	508.7	353.7	296.6
Nicht geerntete Holzmenge [fm]	0	204.7	287.4
MAS [h]	21.3	14.9	12.3
Anteil an den MAS mit Zeitgrad 100 [%]	123.8	123.1	123.0
TAP [fm/MAS]	23.9	23.7	24.1
Zurückgelegte Wegstrecke [km]	7.9	6.1	5.4
Fm-Kosten [€/fm]	6.78	6.83	6.73
Tastsächlich entnommen [Stk] **(Zeitgrad 100)**	1085	750	611
Tastsächlich entnommen [%] **(Zeitgrad 100)**	100	63.0	49.1
Außer Reichweite [Stk]	0	440	634
Anteil "Positionieren" an RAZ [%]	36.1	35.8	35.1
Anteil "Fahrzeiten" an RAZ [%]	20.3	21.3	22
Geerntete Holzmenge [fm]	508.7	353.7	296.6
Nicht geerntete Holzmenge [fm]	0	1099	287.4
MAS [h]	17.2	12.1	10
TAP [fm/MAS]	29.7	29.3	29.7
Zurückgelegte Wegstrecke [km]	7.9	6.1	5.4
Fm-Kosten [€/fm]	5.47	5.53	5.46
Tastsächlich entnommen [Stk] **(Zeitgrad 130)**	1085	750	611
Tastsächlich entnommen [%] **(Zeitgrad 130)**	100	63	49.1
Außer Reichweite [Stk]	0	440	634
Anteil "Positionieren" an RAZ [%]	33.2	32.8	32.1
Anteil "Fahrzeiten" an RAZ [%]	26.7	27.9	28.8
Geerntete Holzmenge [fm]	508.7	353.7	296.6
Nicht geerntete Holzmenge [fm]	0	204.7	287.4
MAS [h]	13.1	9.2	7.7
Anteil an den MAS mit Zeitgrad 100 [%]	76.2	76.0	77.0
TAP [fm/MAS]	38.9	38.4	38.8
Zurückgelegte Wegstrecke [km]	7.9	6.1	5.4
Fm-Kosten [€/fm]	4.16	4.23	4.18

Anhang IV

Tabelle 104: Simulationsergebnisse Versuchsreihe 3 für das System Harvester

	20 m RG-Abstand	30 m RG-Abstand	40 m RG-Abstand
Anzahl zu entnehmender Bäume [Stk]	**1085**	**1190**	**1245**
Tastsächlich entnommen [Stk] **(MAS in % der GAZ = 50 %)**	1085	750	611
Geerntete Holzmenge [fm]	508.7	353.7	296.6
MAS [h]	17.2	12.1	10
GAZ [h]	38.0	23.1	12.7
AZ [h]	20.8	11.0	2.7
Gemessener Anteil AZ an GAZ [%]	54.9	47.8	21.1
Anzahl Unterbrechungen [Stk]	6.0	3.0	1.0
TAP [fm/MAS]	29.6	29.3	29.7
Produktivität [fm/h]	13.4	15.3	23.5
Tastsächlich entnommen [Stk] **(MAS in % der GAZ = 60 %)**	1085	750	611
Geerntete Holzmenge [fm]	508.7	353.7	296.6
MAS [h]	17.2	12.1	10
GAZ [h]	30.8	18.0	12.7
AZ [h]	13.6	5.9	2.7
Gemessener Anteil AZ an GAZ [%]	44.3	33.0	21.1
Anzahl Unterbrechungen [Stk]	4.0	2.0	1.0
TAP [fm/MAS]	29.6	29.3	29.7
Produktivität [fm/h]	16.5	19.6	23.5
Tastsächlich entnommen [Stk] **(MAS in % der GAZ = 70 %)**	1085	750	611
Geerntete Holzmenge [fm]	508.7	353.7	296.6
MAS [h]	17.2	12.1	10
GAZ [h]	23.1	14.7	12.7
AZ [h]	5.9	2.6	2.7
Gemessener Anteil AZ an GAZ [%]	25.8	18.1	21.1
Anzahl Unterbrechungen [Stk]	2.0	1.0	1.0
TAP [fm/MAS]	29.6	29.3	29.7
Produktivität [fm/h]	22	24	23.5
Tastsächlich entnommen [Stk] **(MAS in % der GAZ = 80 %)**	1085	750	611
Geerntete Holzmenge [fm]	508.7	353.7	296.6
MAS [h]	17.2	12.1	10
GAZ [h]	23.1	14.7	12.7
AZ [h]	5.9	2.6	2.7
Gemessener Anteil AZ an GAZ [%]	25.8	18.1	21.1
Anzahl Unterbrechungen [Stk]	2.0	1.0	1.0
TAP [fm/MAS]	29.6	29.3	29.7
Produktivität [fm/h]	22	24	23.5
Tastsächlich entnommen [Stk] **(MAS in % der GAZ = 90 %)**	1085	750	611
Geerntete Holzmenge [fm]	508.7	353.7	296.6
MAS [h]	17.2	12.1	10
GAZ [h]	19.8	14.7	12.7

AZ [h]	2.6	2.6	2.7
Gemessener Anteil AZ an GAZ [%]	13.5	18.1	21.1
Anzahl Unterbrechungen [Stk]	1	1.0	1
TAP [fm/MAS]	29.6	29.3	29.7
Produktivität [fm/h]	25.6	24	23.5
Tastsächlich entnommen [Stk] **(MAS in % der GAZ = 100 %)**	1085	750	611
Geerntete Holzmenge [fm]	508.7	353.7	296.6
MAS [h]	17.2	12.1	10
GAZ [h]	17.2	12.1	10.0
AZ [h]	0.0	0.0	0.0
Gemessener Anteil AZ an GAZ [%]	0.0	0.0	0.0
Anzahl Unterbrechungen [Stk]	0.0	0.0	0.0
TAP [fm/MAS]	29.6	29.3	29.7
Produktivität [fm/h]	29.6	29.3	29.7

Anhang V

Tabelle 105: Simulationsergebnisse Versuchsreihe 2 für das System Motormanuelle Holzernte

	Zeitgrad	20 m RG-Abstand	30 m RG-Abstand	40 m RG-Abstand
Anzahl geernteter Bäume [Stk]		**1085**	**1190**	**1245**
Tastsächlich entnommen [Stk]				
Arbeiter 1	**70**	269	325	292
Arbeiter 2	**100**	354	394	443
Arbeiter 3	**130**	462	471	510
GESAMT		**1085**	**1190**	**1245**
Tastsächlich entnommen [%]				
Arbeiter 1	**70**	24.8	27.3	23.5
Arbeiter 2	**100**	32.6	33.1	35.6
Arbeiter 3	**130**	42.6	39.6	41.0
GESAMT		**100.0**	**100.0**	**100.0**
Geerntete Holzmenge [fm]				
Arbeiter 1	**70**	112.9	122.4	141.4
Arbeiter 2	**100**	160.1	177	179.8
Arbeiter 3	**130**	235.7	259	262.8
GESAMT		**508.7**	**558.4**	**584**
MAS [h]				
Arbeiter 1	**70**	78.5	87.9	95.6
Arbeiter 2	**100**	83.9	94.1	97.2
Arbeiter 3	**130**	85.2	91.6	94.2
GESAMT		**247.6**	**273.6**	**287**
TAP [fm/MAS]				
Arbeiter 1	**70**	1.4	1.4	1.5
Arbeiter 2	**100**	1.9	1.9	1.9
Arbeiter 3	**130**	2.8	2.8	2.8
Durchschnitt		**2.1**	**2**	**2**
Arbeitstage [Stk.]				
Arbeiter 1	**70**	9.5	10.6	11.5
Arbeiter 2	**100**	10.1	11.3	11.7
Arbeiter 3	**130**	10.3	11	11.4
Durchschnitt		**9.9**	**11**	**11.5**
Fm-Kosten [€/fm]				
Arbeiter 1	**70**	14	14.4	13.57
Arbeiter 2	**100**	10.7	10.8	11
Arbeiter 3	**130**	7.5	7.3	7.43
Durchschnitt		**9.9**	**10**	**10**

Anhang VI

Tabelle 106: Simulationsergebnisse Versuchsreihe 1 für das System Forwarder

	20 m RG-Abstand	30 m RG-Abstand	40 m RG-Abstand
Anzahl zu transportierender Abschnitte [Stk]	**5402**	**5940**	**6208**
Transportierte Abschnitte [Stk] **(Ladekapazität 7 fm)**	5402	5940	6208
Transportierte Abschnitte [%] **(Ladekapazität 7 fm)**	100.0	100.0	100.0
Transportierte Holzmenge [fm]	508.7	558.4	584
MAS [h]	35.5	36.2	36.2
TAP [fm/MAS]	14.3	15.4	16.1
Anteil "Fahrzeiten" an RAZ [%]	74.6	73	72.1
Fm-Kosten [€/fm]	11.24	10.43	9.99
Transportierte Abschnitte [Stk] **(Ladekapazität 8 fm)**	5402	5940	6208
Transportierte Abschnitte [%] **(Ladekapazität 8 fm)**	100.0	100.0	100.0
Transportierte Holzmenge [fm]	508.7	558.4	584
MAS [h]	35.3	35.8	35.8
TAP [fm/MAS]	14.4	15.6	16.3
Anteil "Fahrzeiten" an RAZ [%]	74.1	72.2	71.1
Fm-Kosten [€/fm]	11.18	10.33	9.87
Transportierte Abschnitte [Stk] **(Ladekapazität 9 fm)**	5402	5940	6208
Transportierte Abschnitte [%] **(Ladekapazität 9 fm)**	100.0	100.0	100.0
Transportierte Holzmenge [fm]	508.7	558.4	584
MAS [h]	35.1	35.5	35.7
TAP [fm/MAS]	14.5	15.7	16.4
Anteil "Fahrzeiten" an RAZ [%]	73.6	71.4	70.8
Fm-Kosten [€/fm]	11.1	10.23	9.83
Transportierte Abschnitte [Stk] **(Ladekapazität 10 fm)**	5402	5940	6208
Transportierte Abschnitte [%] **(Ladekapazität 10 fm)**	100.00	100.0	100.0
Transportierte Holzmenge [fm]	508.7	558.4	584
MAS [h]	35	35.4	35.5
TAP [fm/MAS]	14.53	15.8	16.5
Anteil "Fahrzeiten" an RAZ [%]	73.1	71.2	70.4
Fm-Kosten [€/fm]	11.08	10.2	9.78
Transportierte Abschnitte [Stk] **(Ladekapazität 11 fm)**	5402	5940	6208
Transportierte Abschnitte [%] **(Ladekapazität 11 fm)**	100.0	100.0	100.0
Transportierte Holzmenge [fm]	508.7	558.4	584
MAS [h]	34.5	35.2	35
TAP [fm/MAS]	14.74	15.9	16.7
Anteil "Fahrzeiten" an RAZ [%]	72.4	70.7	69.7
Fm-Kosten [€/fm]	10.92	10.14	9.66
Transportierte Abschnitte [Stk] **(Ladekapazität 12 fm)**	5402	5940	6208
Transportierte Abschnitte [%] **(Ladekapazität 12 fm)**	100.0	100.0	100.0
Transportierte Holzmenge [fm]	508.7	558.4	584
MAS [h]	34.9	34.9	35
TAP [fm/MAS]	14.59	16	16.7

Anteil "Fahrzeiten" an RAZ [%]	72.3	70.4	69.6
Fm-Kosten [€/fm]	11.03	10.05	9.65
Transportierte Abschnitte [Stk] **(Ladekapazität 13 fm)**	5402	5940	6208
Transportierte Abschnitte [%] **(Ladekapazität 13 fm)**	100.0	100.0	100.0
Transportierte Holzmenge [fm]	508.7	558.4	584
MAS [h]	34.7	34.9	35.1
TAP [fm/MAS]	14.68	16	16.6
Anteil "Fahrzeiten" an RAZ [%]	72.3	69.9	69.1
Fm-Kosten [€/fm]	10.97	10.05	9.68

Anhang VII

Tabelle 107: Simulationsergebnisse Versuchsreihe 2 für das System Forwarder

	20 m RG-Abstand	30 m RG-Abstand	40 m RG-Abstand
Anzahl zu transportierender Abschnitte [Stk]	**5402**	**5940**	**6208**
Transportierte Abschnitte [Stk] **(Zeitgrad 70)**	5402	5940	6208
Transportierte Abschnitte [%] **(Zeitgrad 70)**	100.00	100.0	100.0
Außer Reichweite [Stk]	0	0	0
Anteil "Kranarbeit" an RAZ [%]	29.5	31.2	32
Anteil "Fahrzeiten" an RAZ [%]	70.5	68.8	68
Geerntete Holzmenge [fm]	508.7	558.4	584
Nicht geerntete Holzmenge [fm]	0	0	0
MAS [h]	41.4	42.4	42.7
Anteil an den MAS mit Zeitgrad 100 [%]	118.3	119.8	120.3
TAP [fm/MAS]	12.28	13.2	13.7
Fm-Kosten [€/fm]	13.12	12.23	11.77
Transportierte Abschnitte [Stk] **(Zeitgrad 100)**	5402	5940	6208
Transportierte Abschnitte [%] **(Zeitgrad 100)**	100.00	100.0	100.0
Außer Reichweite [Stk]	0	0	0
Anteil "Kranarbeit" an RAZ [%]	26.9	28.8	29.6
Anteil "Fahrzeiten" an RAZ [%]	73.1	71.2	70.4
Geerntete Holzmenge [fm]	508.7	558.4	584
Nicht geerntete Holzmenge [fm]	0	0	0
MAS [h]	35	35.4	35.5
TAP [fm/MAS]	14.53	15.8	16.5
Fm-Kosten [€/fm]	11.08	10.2	9.78
Transportierte Abschnitte [Stk] **(Zeitgrad 130)**	5402	5940	6208
Transportierte Abschnitte [%] **(Zeitgrad 130)**	100.0	100.0	100.0
Außer Reichweite [Stk]	0	0	0
Anteil "Kranarbeit" an RAZ [%]	23	25.1	26
Anteil "Fahrzeiten" an RAZ [%]	77	74.9	74
Geerntete Holzmenge [fm]	508.7	558.4	584
Nicht geerntete Holzmenge [fm]	0	0	0
MAS [h]	28.6	28.4	28.3
Anteil an den MAS mit Zeitgrad 100 [%]	81.7	80.2	79.7
TAP [fm/MAS]	17.81	19.6	20.7
Fm-Kosten [€/fm]	9.04	8.2	7.79

Anhang VIII

Tabelle 108: Simulationsergebnisse Versuchsreihe 3 für das System Forwarder

	20 m RG-Abstand	30 m RG-Abstand	40 m RG-Abstand
Anzahl zu transportierender Abschnitte [Stk]	**5402**	**5940**	**6208**
Transportierte Abschnitte [Stk] **(MAS in % der GAZ = 50 %)**	5402	5940	6208
Transportierte Abschnitte [%]	100.0	100.0	100.0
Geerntete Holzmenge [fm]	508.7	558.4	584
MAS [h]	34.9	35.3	35.5
GAZ [h]	74.1	74.5	74.7
AZ [h]	39.2	39.2	39.2
Gemessener Anteil AZ an GAZ [%]	52.9	52.6	52.5
Anzahl Unterbrechungen [Stk]	18	18	18
TAP [fm/MAS]	14.56	15.8	16.5
Produktivität [fm/h]	6.86	7.5	7.8
Fm-Kosten [€/fm]	11.06	10.17	9.77
Transportierte Abschnitte [Stk] **(MAS in % der GAZ = 60 %)**	5402	5940	6208
Transportierte Abschnitte [%]	100.00	100.0	100.0
Geerntete Holzmenge [fm]	508.7	558.4	584
MAS [h]	35.1	35.3	35.4
GAZ [h]	59.8	60.1	60.1
AZ [h]	24.7	24.8	24.7
Gemessener Anteil AZ an GAZ [%]	41.4	41.8	41.1
Anzahl Unterbrechungen [Stk]	12	12	12
TAP [fm/MAS]	14.51	15.8	16.5
Produktivität [fm/h]	8.51	9.3	9.7
Fm-Kosten [€/fm]	11.1	10.19	9.75
Transportierte Abschnitte [Stk] **(MAS in % der GAZ = 70 %)**	5402	5940	6208
Transportierte Abschnitte [%]	100.00	100.0	100.0
Geerntete Holzmenge [fm]	508.7	558.4	584
MAS [h]	34.9	35.4	35.5
GAZ [h]	51.2	51.6	51.8
AZ [h]	16.3	16.2	16.3
Gemessener Anteil AZ an GAZ [%]	31.8	31.5	31.4
Anzahl Unterbrechungen [Stk]	8	8	8
TAP [fm/MAS]	14.57	15.8	16.5
Produktivität [fm/h]	9.94	10.8	11.3
Fm-Kosten [€/fm]	11.05	10.2	9.79
Transportierte Abschnitte [Stk] **(MAS in % der GAZ = 80 %)**	5402	5940	6208
Transportierte Abschnitte [%]	100.00	100.0	100.0
Geerntete Holzmenge [fm]	508.7	558.4	584
MAS [h]	35.1	35.5	35.5
GAZ [h]	46.2	46.6	46.6
AZ [h]	11.1	11.1	11.1
Gemessener Anteil AZ an GAZ [%]	24.1	23.9	23.9

Anzahl Unterbrechungen [Stk]	5	5	5
TAP [fm/MAS]	14.51	15.7	16.5
Produktivität [fm/h]	11.02	12	12.5
Fm-Kosten [€/fm]	11.09	10.23	9.79
Transportierte Abschnitte [Stk] **(MAS in % der GAZ = 90 %)**	5402	5940	6208
Transportierte Abschnitte [%]	100.00	100.0	100.0
Geerntete Holzmenge [fm]	508.7	558.4	584
MAS [h]	35.1	35.4	35.6
GAZ [h]	38.5	38.8	39
AZ [h]	3.4	3.4	3.4
Gemessener Anteil AZ an GAZ [%]	8.9	8.8	8.8
Anzahl Unterbrechungen [Stk]	2	2	2
TAP [fm/MAS]	14.49	15.8	16.4
Produktivität [fm/h]	13.2	14.4	15
Fm-Kosten [€/fm]	11.11	10.21	9.81
Transportierte Abschnitte [Stk] **(MAS in % der GAZ = 100 %)**	5402	5940	6208
Transportierte Abschnitte [%]	100.00	100.0	100.0
Geerntete Holzmenge [fm]	508.7	558.4	584
MAS [h]	35	35.4	35.5
GAZ [h]	35.0	35.4	35.5
AZ [h]	0.0	0.0	0.0
Gemessener Anteil AZ an GAZ [%]	0.0	0.0	0.0
Anzahl Unterbrechungen [Stk]	0	0	0
TAP [fm/MAS]	14.53	15.8	16.5
Produktivität [fm/h]	14.53	15.8	16.5
Fm-Kosten [€/fm]	11.08	10.2	9.78

Anhang IX

Verwendung der einzelnen Systemparameter bei der Berechnung der gesuchten Zielgrößen für das System Harvester		
Parameter	**Einstellungsart**	**Erläuterungen**
Treibstoffverbrauch	Vorgabe durch Benutzer (Frontend)	Dieser Wert findet bei der Berechnung der Endergebnisse in MS Excel Verwendung.
Treibstoffpreis	Vorgabe durch Benutzer (Frontend)	Dieser Wert findet bei der Berechnung der Endergebnisse in MS Excel Verwendung.
Ruestzeit	Vorgabe durch Benutzer (Frontend)	Nach Simulationsbeginn wird diese Rüstzeit verbraucht.
Geschwindigkeit auf der Forststraße	Vorgabe durch Benutzer (Frontend)	Beim Befahren eines neuen Abschnitts wird ggf. diese Geschwindigkeit gesetzt.
Geschwindigkeit auf der Rückegasse	Vorgabe durch Benutzer (Frontend)	Beim Befahren eines neuen Abschnitts wird ggf. diese Geschwindigkeit gesetzt.
Kranreichweite	Vorgabe durch Benutzer (Frontend)	Wird beim Aufstellen der Bäume überprüft, um eine Harvesterzuordnung festzustellen.
Minimaler Erntedurchmesser	Vorgabe durch Benutzer (Frontend)	Wird beim Aufstellen der Bäume überprüft, um eine Harvesterzuordnung festzustellen.
Maximaler Erntedurchmesser	Vorgabe durch Benutzer (Frontend)	Wird beim Aufstellen der Bäume überprüft, um eine Harvesterzuordnung festzustellen.
Zeitgrad [%]	Vorgabe durch Benutzer (Frontend)	Auf die Zeiten für das Fällen und Aufarbeiten wird der Zeitgrad in der Simulation mit aufgeschlagen.
MAS [% von MS]	Vorgabe durch Benutzer (Frontend)	Fließt in das Störungsmodul ein.
Unterbrechungen [% von MS]	Vorgabe durch Benutzer (Frontend)	Fließt in das Störungsmodul ein.
Davon RWS, WUS und AFS [% von Unterbrechungen]	Vorgabe durch Benutzer (Frontend)	Fließt in das Störungsmodul ein.
RWS, WUS, AFS	Vorgabe durch Benutzer (Frontend)	Fließt in das Störungsmodul ein.
Maschinenkosten	Vorgabe durch Benutzer (Frontend)	Dieser Wert findet bei der Berechnung der Endergebnisse in MS Excel Verwendung.
Verwendung der einzelnen Systemparameter bei der Berechnung der gesuchten Zielgrößen für das System Motormanuelle Holzernte		
Treibstoffverbrauch	Vorgabe durch Benutzer (Frontend)	Dieser Wert findet bei der Berechnung der Endergebnisse in MS Excel Verwendung.
Treibstoffpreis	Vorgabe durch Benutzer (Frontend)	Dieser Wert findet bei der Berechnung der Endergebnisse in MS Excel Verwendung.
Schmiermittelverbrauch	Vorgabe durch Benutzer (Frontend)	Dieser Wert findet bei der Berechnung der Endergebnisse in MS Excel Verwendung.
Schmiermittelpreis	Vorgabe durch Benutzer (Frontend)	Dieser Wert findet bei der Berechnung der Endergebnisse in MS Excel Verwendung.
Anzahl der Arbeiter	Vorgabe durch Benutzer (Frontend)	Beim Simulationsstart werden entsprechend viele Waldarbeiter erzeugt.
Zeitgrad Arbeiter 1-3	Vorgabe durch Benutzer (Frontend)	Auf alle Zeiten in der Simulation wird der Zeitgrad mit aufgeschlagen.
Geldfaktor Arbeit	Vorgabe durch Benutzer (Frontend)	Dieser Wert findet bei der Berechnung der Endergebnisse in MS Excel Verwendung.
Entschädigung Motorsäge	Vorgabe durch Benutzer (Frontend)	Dieser Wert findet bei der Berechnung der Endergebnisse in MS Excel Verwendung.
Lohnbegrenzung	Vorgabe durch Benutzer (Frontend)	Dieser Wert findet bei der Berechnung der Endergebnisse in MS Excel Verwendung.

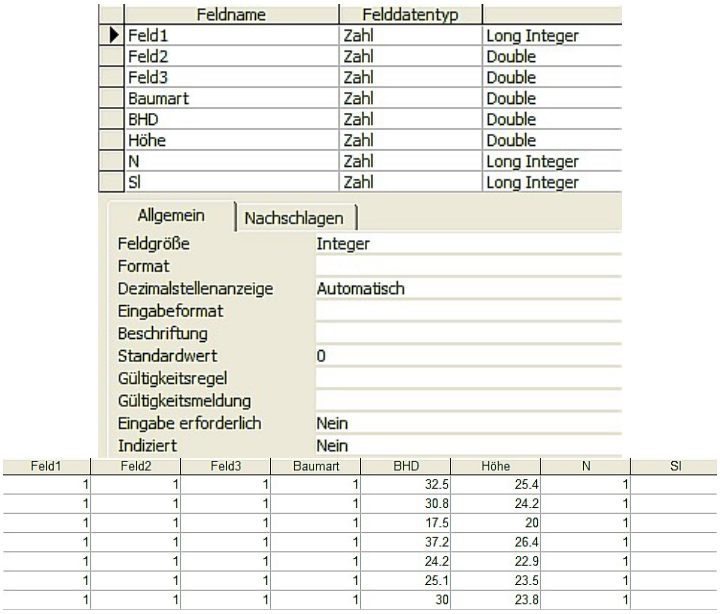
Verwendung der einzelnen Systemparameter bei der Berechnung der gesuchten Zielgrößen für das System Forwarder		
Treibstoffverbrauch	Vorgabe durch Benutzer (Frontend)	Dieser Wert findet bei der Berechnung der Endergebnisse in MS Excel Verwendung.
Treibstoffpreis	Vorgabe durch Benutzer (Frontend)	Dieser Wert findet bei der Berechnung der Endergebnisse in MS Excel Verwendung.
Ruestzeit	Vorgabe durch Benutzer (Frontend)	Nach Simulationsbeginn wird die Rüstzeit verbraucht.
Fahrgeschwindigkeit beladen auf der Forststraße	Vorgabe durch Benutzer (Frontend)	Beim Befahren eines neuen Abschnitts wird, bei Bedarf, die Geschwindigkeit gesetzt.
Fahrgeschwindigkeit unbeladen auf der Forststraße	Vorgabe durch Benutzer (Frontend)	Beim Befahren eines neuen Abschnitts wird, bei Bedarf, die Geschwindigkeit gesetzt.
Fahrgeschwindigkeit beladen auf der Rückegasse	Vorgabe durch Benutzer (Frontend)	Beim Befahren eines neuen Abschnitts wird, bei Bedarf, die Geschwindigkeit gesetzt.
Fahrgeschwindigkeit unbeladen auf der Rückegasse	Vorgabe durch Benutzer (Frontend)	Beim Befahren eines neuen Abschnitts wird, bei Bedarf, die Geschwindigkeit gesetzt.
Fahrgeschwindigkeit während des Beladevorgangs auf der Rückegasse (Arbeitsfahrt)	Vorgabe durch Benutzer (Frontend)	Sobald der erste Sortimentsabschnitt geladen wurde, wird diese Geschwindigkeit gesetzt.
Kranreichweite	Vorgabe durch Benutzer (Frontend)	Jeder Sortimentsabschnitt prüft, ob er nah genug liegt, dass er einen Forwarder anfordern könnte.
Ladekapazität	Vorgabe durch Benutzer (Frontend)	Beim Beladen, wird das Sortiments-abschnittsvolumen gegen die Ladekapazität geprüft.
Zangenkapazität	Vorgabe durch Benutzer (Frontend)	Beim Füllen der Zange wird gegen diese Größe geprüft.
Zeitgrad [%]	Vorgabe durch Benutzer (Frontend)	Auf die Zeiten für das Beladen, Entladen und Kranen in der Simulation wird der Zeitgrad mit aufgeschlagen.
MAS [% von MS]	Vorgabe durch Benutzer (Frontend)	Fließt in das Störungsmodul ein.
Unterbrechungen [% von MS]	Vorgabe durch Benutzer (Frontend)	Fließt in das Störungsmodul ein.
Davon RWS, WUS und AFS [% von Unterbrechungen]	Vorgabe durch Benutzer (Frontend)	Fließt in das Störungsmodul ein.
RWS, WUS, AFS	Vorgabe durch Benutzer (Frontend)	Fließt in das Störungsmodul ein.
Maschinenkosten	Vorgabe durch Benutzer (Frontend)	Dieser Wert findet bei der Berechnung der Endergebnisse in MS Excel Verwendung.
Verwendung der einzelnen Systemparameter bei der Berechnung der gesuchten Zielgrößen für das System Schlepper		
Treibstoffverbrauch	Vorgabe durch Benutzer (Frontend)	Dieser Wert findet bei der Berechnung der Endergebnisse in MS Excel Verwendung.
Treibstoffpreis	Vorgabe durch Benutzer (Frontend)	Dieser Wert findet bei der Berechnung der Endergebnisse in MS Excel Verwendung.
Ruestzeit	Vorgabe durch Benutzer (Frontend)	Nach Simulationsbeginn wird die Rüstzeit verbraucht.
Zangenkapazität	Vorgabe durch Benutzer (Frontend)	Beim Füllen der Zange wird gegen diese Größe geprüft.
Zeitgrad [%]	Vorgabe durch Benutzer (Frontend)	Auf alle Zeiten in der Simulation wird der Zeitgrad mit aufgeschlagen.
Strategie des Schleppers	Vorgabe durch Benutzer (Frontend)	Vor dem Start wird festgelegt, mit welcher Strategie der Schlepper fährt.
Lage der Sortimente	Vorgabe durch Benutzer (Frontend)	Vor dem Start der Simulation bestimmt jeder Baum, wo sein Sortiment abgelegt werden soll.

Bestandesschäden	Vorgabe durch Benutzer (Frontend)	Auf alle Zeiten in der Simulation wird dieser Zuschlag mit aufgeschlagen.
Maschinenkosten	Vorgabe durch Benutzer (Frontend)	Dieser Wert findet bei der Berechnung der Endergebnisse in MS Excel Verwendung.
Verwendung der einzelnen Systemparameter bei der Berechnung der gesuchten Zielgrößen für das System Pferd		
Zeitgrad Pferd 1	Vorgabe durch Benutzer (Frontend)	Auf alle Zeiten in der Simulation wird der Zeitgrad mit aufgeschlagen.
Kostensatz	Vorgabe durch Benutzer (Frontend)	Dieser Wert findet bei der Berechnung der Endergebnisse in MS Excel Verwendung.
Zugkapazität	Vorgabe durch Benutzer (Frontend)	Beim Füllen der Seilschlinge wird diese Kapazität gegengeprüft.

Anhang X

Handhabung der Kalkulationssoftware HOLZERNTE

1. EXCEL-Tabelle des ausscheidenden Bestandes aus SILVA in MS Access importieren **(ACHTUNG: Die Spalten müssen schon in Excel alle als ZAHL formatiert sein!)**
   a. In MS Access neue Datenbank öffnen, dann
   b. Datei => Externe Daten => Importieren
2. Die neu erzeugte Access-Tabelle muss wie folgt formatiert werden (s. Abbildung 177):



	Feldname	Felddatentyp	
▶	Feld1	Zahl	Long Integer
	Feld2	Zahl	Double
	Feld3	Zahl	Double
	Baumart	Zahl	Double
	BHD	Zahl	Double
	Höhe	Zahl	Double
	N	Zahl	Long Integer
	SI	Zahl	Long Integer

Allgemein | Nachschlagen

Feldgröße	Integer
Format	
Dezimalstellenanzeige	Automatisch
Eingabeformat	
Beschriftung	
Standardwert	0
Gültigkeitsregel	
Gültigkeitsmeldung	
Eingabe erforderlich	Nein
Indiziert	Nein

Feld1	Feld2	Feld3	Baumart	BHD	Höhe	N	SI
1	1	1	1	32.5	25.4	1	
1	1	1	1	30.8	24.2	1	
1	1	1	1	17.5	20	1	
1	1	1	1	37.2	26.4	1	
1	1	1	1	24.2	22.9	1	
1	1	1	1	25.1	23.5	1	
1	1	1	1	30	23.8	1	

Abbildung 177: Formatierung der Tabelle des ausscheidenden Bestandes in MS Access für die Überführung der SILVA-Daten nach HOLZERNTE

3. Diese Tabelle in MS Access mit der rechten Maustaste anklicken → Exportieren → in die Access-Datenbank „Baum“ unter Laufwerk:Ernte exportieren **(ACHTUNG: Keine Leerzeichen in den Dateinamen verwenden! Die Spalten müssen alle als Zahl formatiert sein!)**
4. Das Programm HOLZERNTE öffnen
5. In HOLZERNTE: Datei → Vorkalkulation → Neu
6. Hier Modell anklicken und eine neue Variante auswählen

7. Das Menü M1 ausfüllen (s. Abbildung 178)

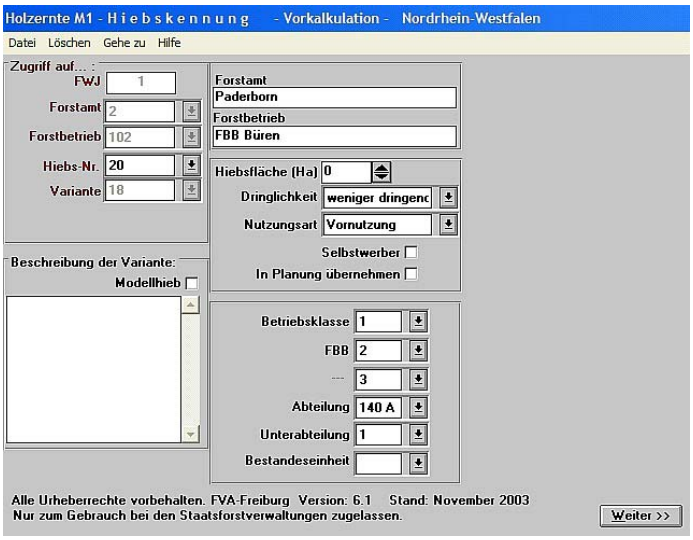


Abbildung 178: Das HOLZERNTE-Menü M1 (Quelle: Software HOLZERNTE, FVA Baden-Württemberg)

8. Weiter → Das Menü M2 öffnet sich (s. Abbildung 179); Einstellungen vornehmen (**mit 1000 Bäumen arbeiten!**)

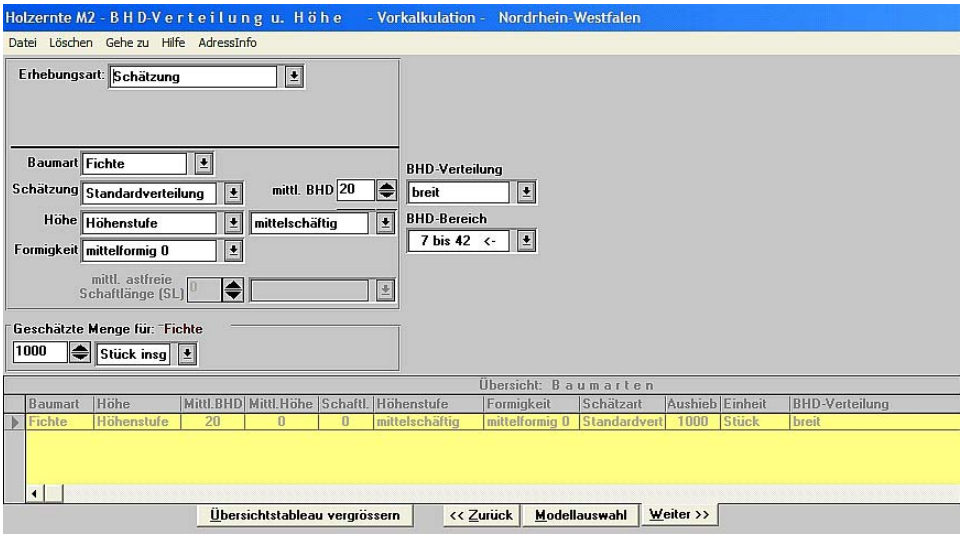


Abbildung 179: Das HOLZERNTE-Menü M2 (Quelle: Software HOLZERNTE, FVA Baden-Württemberg)

9. In M3 Güten festlegen, Aufarbeitungszopf so belassen wie vorgeschlagen (s. Abbildung 180)

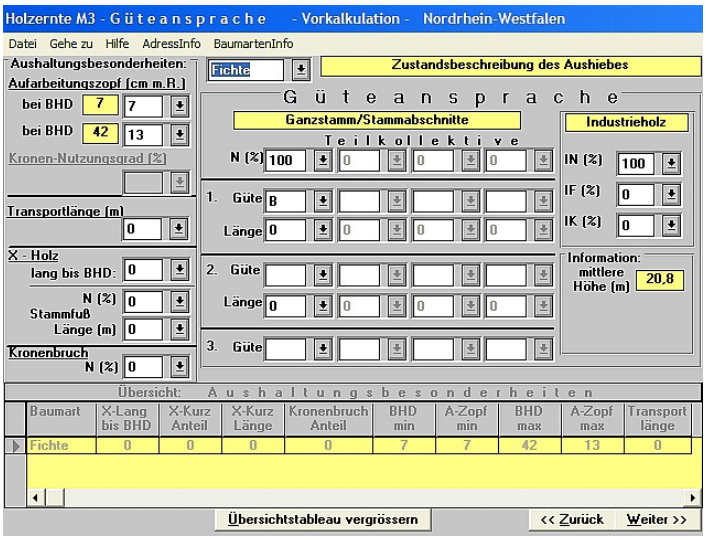


Abbildung 180: Das HOLZERNTE-Menü M3 (Quelle: Software HOLZERNTE, FVA Baden-Württemberg)

10. In M4 die Lose und deren Güten festlegen (s. Abbildung 181) → Hier orientiert man sich an den Losen des letzten, realen Einschlages im Bestand. Diese Informationen konnten über das zuständige Forstamt bezogen werden.

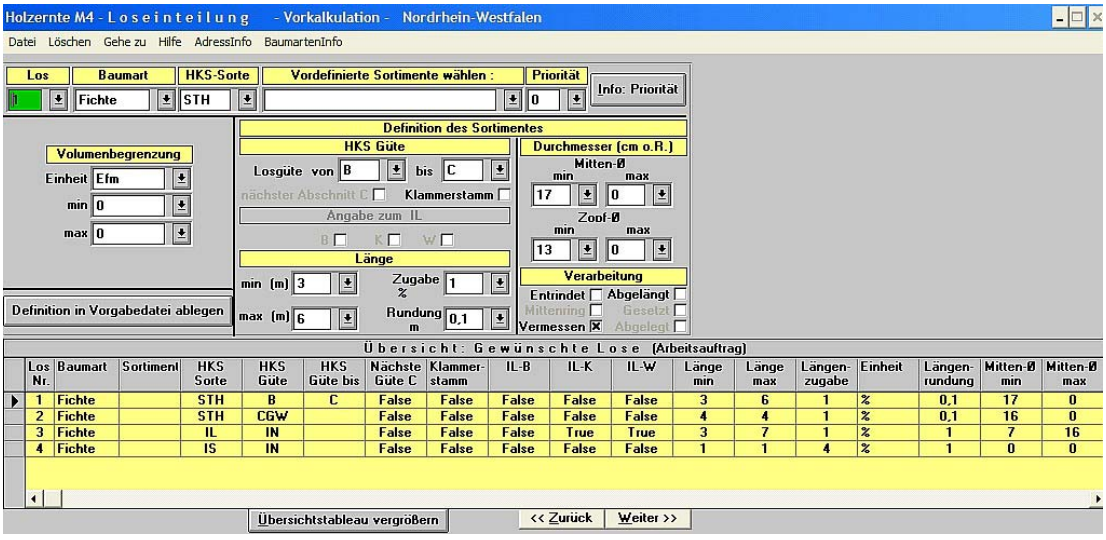
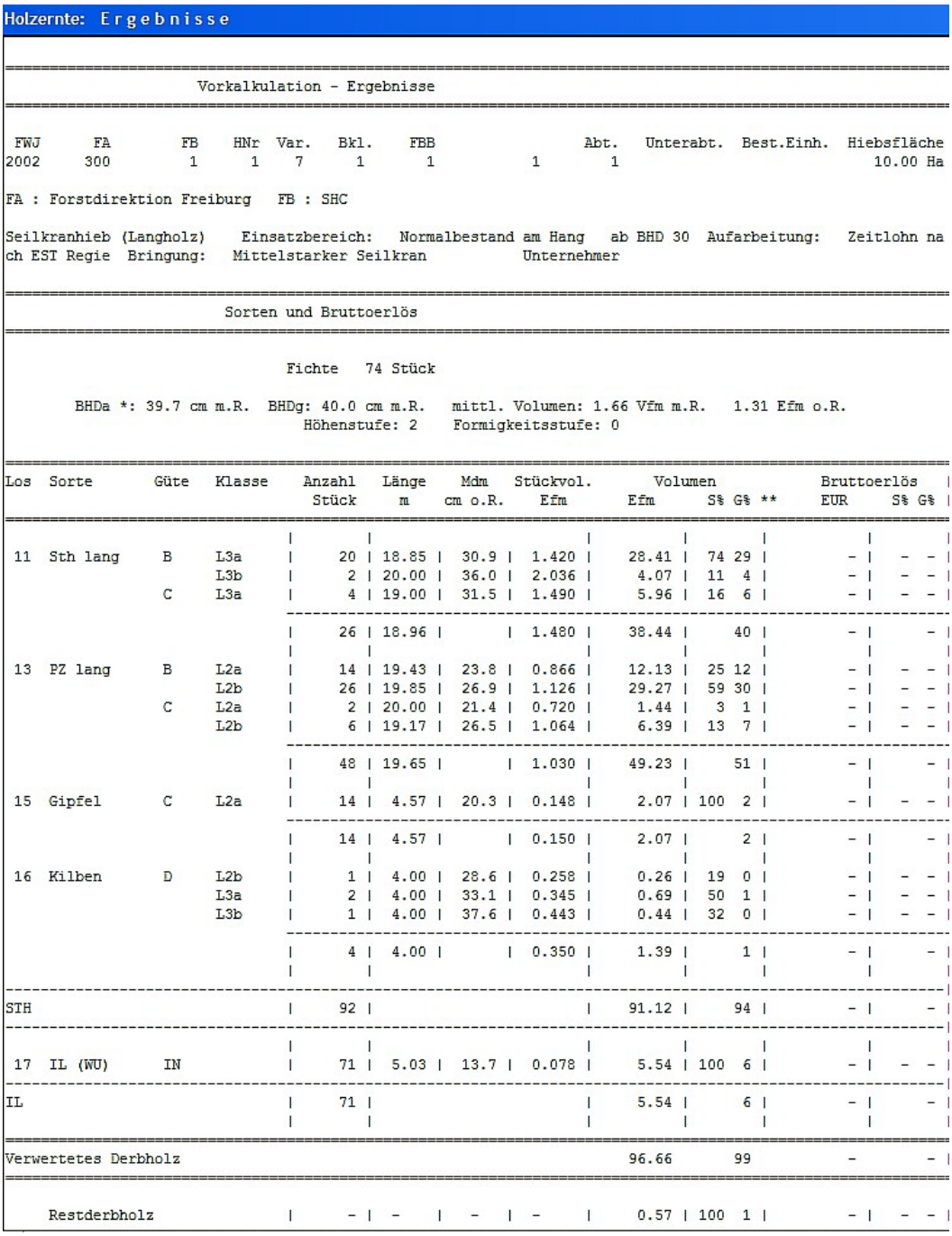


Abbildung 181: Das HOLZERNTE-Menü M4 (Quelle: Software HOLZERNTE, FVA Baden-Württemberg)

11. Dann in M4 unter Datei → Berechnen/Drucken die Sorten berechnen lassen (s. Abbildung 182 und Abbildung 183) und die Güteanteile so lange verändern, bis sie von den Prozentwerten her etwa bei den Prozentwerten des realen Hiebes liegen. Auch diese Werte kann das Forstamt bereitstellen.

Abbildung 182: Das Menü "Berechnen/Drucken" in HOLZERNTE (Quelle: Software HOLZERNTE, FVA Baden-Württemberg)



Holzernte: Ergebnisse

Vorkalkulation - Ergebnisse

FWJ	FA	FB	HNr	Var.	Bkl.	FBB		Abt.	Unterabt.	Best.Einh.	Hiebsfläche
2002	300	1	1	7	1	1	1	1			10.00 Ha

FA : Forstdirektion Freiburg FB : SHC

Seilkranhieb (Langholz) Einsatzbereich: Normalbestand am Hang ab BHD 30 Aufarbeitung: Zeitlohn nach EST Regie Bringung: Mittelstarker Seilkran Unternehmer

Sorten und Bruttoerlös

Fichte 74 Stück

BHDa *: 39.7 cm m.R. BHDg: 40.0 cm m.R. mittl. Volumen: 1.66 Vfm m.R. 1.31 Efm o.R.
Höhenstufe: 2 Formigkeitsstufe: 0

Los	Sorte	Güte	Klasse	Anzahl Stück	Länge m	Mdm cm o.R.	Stückvol. Efm	Volumen Efm	Volumen S%	Volumen G% **	Bruttoerlös EUR	Bruttoerlös S%	Bruttoerlös G%
11	Sth lang	B	L3a	20	18.85	30.9	1.420	28.41	74	29	-	-	-
			L3b	2	20.00	36.0	2.036	4.07	11	4	-	-	-
		C	L3a	4	19.00	31.5	1.490	5.96	16	6	-	-	-
				26	18.96		1.480	38.44		40	-		-
13	PZ lang	B	L2a	14	19.43	23.8	0.866	12.13	25	12	-	-	-
			L2b	26	19.85	26.9	1.126	29.27	59	30	-	-	-
		C	L2a	2	20.00	21.4	0.720	1.44	3	1	-	-	-
			L2b	6	19.17	26.5	1.064	6.39	13	7	-	-	-
				48	19.65		1.030	49.23		51	-		-
15	Gipfel	C	L2a	14	4.57	20.3	0.148	2.07	100	2	-	-	-
				14	4.57		0.150	2.07		2	-		-
16	Kilben	D	L2b	1	4.00	28.6	0.258	0.26	19	0	-	-	-
			L3a	2	4.00	33.1	0.345	0.69	50	1	-	-	-
			L3b	1	4.00	37.6	0.443	0.44	32	0	-	-	-
				4	4.00		0.350	1.39		1	-		-
STH				92				91.12		94	-		-
17	IL (WU)	IN		71	5.03	13.7	0.078	5.54	100	6	-	-	-
IL				71				5.54		6	-		-
Verwertetes Derbholz								96.66		99	-		-
	Restderbholz			-	-	-	-	0.57	100	1	-	-	-

Abbildung 183: Ergebnisse der Berechnungen in HOLZERNTE (Quelle: Software HOLZERNTE, FVA Baden-Württemberg)

12. Im Anschluss an die Berechnung kann das Programm über Datei → Beenden verlassen werden.
13. HOLZERNTE jetzt neu starten und unter Datei → Serienberechnung mit Datenimport Modelle zuordnen öffnen
14. Neue Seriennummer festlegen
15. Unter Datenquelle die aktuelle Tabelle mit dem gesamten Bestand aus der Datei „Baum“ öffnen
16. Unter „Zuordnen“ den aktuellen Bestand auswählen

17. Unter „Übersicht Modellhiebe“ die entsprechende Variante auswählen und nun „Zuweisen“ anklicken (s. Abbildung 184)
18. Nun auf „berechnen“ gehen und die Sorten „in Datei“ berechnen lassen

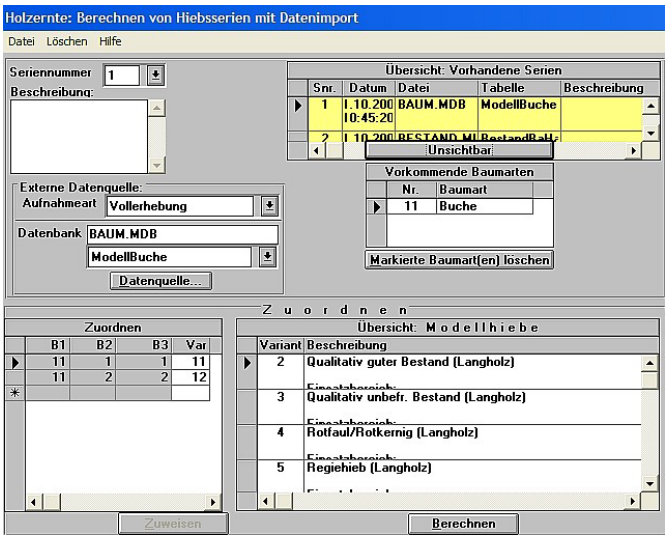


Abbildung 184: Berechnung von Hiebsserien in HOLZERNTE (Quelle: Software HOLZERNTE, FVA Baden-Württemberg)

19. HOLZERNTE mit „Beenden“ und „Datei beenden“ verlassen!!
20. Dann im Verzeichnis Laufwerk:Ernte die Datei „WORKS“ und von dort die Tabellen „Sortenstück“ und „Gütestück“ in eine neue Datenbank exportieren.
21. In der neuen Datenbank aus der Tabelle „Gütestück“ die Spalten „HKS_Güte_Nr“ und „HKS_Güte“ in „Sortenstück“ einfügen
22. Die Tabelle mit den Informationen zu den entstandenen Stammabschnitten für den gesamten Bestand ist damit fertig gestellt